



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

HYDROPNEUMATICKÉ ODPRUŽENÍ VOZIDEL

VEHICLE HYDROPNEUMATIC SUSPENSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Koudelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Roman Koudelka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hydropneumatické odpružení vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydropneumatické odpružení je systémem odpružení s progresivní charakteristikou a je tak využíváno pro vozidla, u nichž se výrazněji mění zatížení nebo je snahou dosáhnout dobrého jízdního pohodlí.

Cíle bakalářské práce:

Vysvětlit základní principy hydropneumatického odpružení vozidel.

Pro jednotlivé typy vozidel (osobní, nákladní, vojenské speciály apod.) charakterizovat konstrukční provedení hydropneumatického odpružení.

Navrhnout základní parametry hydropneumatického odpružení vojenského speciálního vozidla s pohotovostní hmotností cca 10 tun.

Seznam doporučené literatury:

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

DIXON, John. The Shock Absorber Handbook. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 432 s. ISBN 978-0-470-51020-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 10. 2017



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za úkol seznámit čtenáře s problematikou hydropneumatického odpružení. Na úvodní část, jejímž cílem je nastínit historické pozadí systému, plynule navazuje popis principu jeho funkce. Zmíněny jsou též vlastnosti pro něj typické. Tento typ pérování je použit u různých typů vozidel, konkrétní aplikace jsou náplní další části práce. Poslední sekce je zaměřena na samotný návrh odpružení vojenského speciálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

systém, odpružení, pérování, funkce, pružení, tlumení, kapalina, plyn, hydropneumatika, využití, návrh

ABSTRACT

The main task of this bachelor's thesis is introduction of readers with main principles of hydropneumatic suspension. The introductory part, which aims to outline the historical background of the system, continuously follows the description of the principle of its function. This part also contains the typical features of this suspension system. This type of suspension is used at different types of vehicles, the specific applications are mentioned in the next chapter. The last section is about designing suspension for special military vehicle.

KEYWORDS

system, suspension, functioning, spring characteristics, damping characteristics, fluid, gas, hydropneumatic, examples, dimensioning



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUDELKA, R. *Hydropneumatické odpružení vozidel*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ondřej Blatňák.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2018

.....

Roman Koudelka



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Ondřeji Blatňákovi, Ph.D., za cenné rady při tvorbě práce, a především za jeho vstřícný přístup.

OBSAH

Úvod	9
1 Historie	10
2 Popis systému a princip funkce	13
3 Pružící a tlumící charakteristiky	15
3.1 Pružení	15
3.2 Tlumení	21
3.3 Kombinace pružení a tlumení	25
4 Jednotlivé komponenty	26
4.1 Hydraulické válce	26
4.2 Zásobníky (akumulátory)	29
4.3 Průtokové odpory	31
4.4 Vedení	34
5 Systémy pro regulaci úrovně odpružení	37
5.1 Samočerpací systémy	37
5.2 Mechanické řízení úrovně s externím zdrojem hydrauliky	37
5.3 Elektronické řízení úrovně s externím zdrojem hydrauliky	38
6 Speciální funkce	40
6.1 Zablkování odpružení	40
6.2 Nastavení nulové polohy	40
6.3 Změna klonění a klopení	41
6.4 Úprava tuhosti pružiny selektivním připojením zásobníků	42
7 Využití u vozidel	43
7.1 Systémy vyvinuté společností Citroën	43
7.2 ARGO HYTOS	47
7.3 HHP TM Hydro-Pneumatic TM Suspension System	50
8 Návrh odpružení	52
8.1 Návrh komponent pružení	53
8.2 Návrh prvků tlumení	60
Závěr	66
Seznam použitých zkratk a symbolů	71

ÚVOD

Hydropneumatika je specifický systém odpružení vozidel, který kombinuje vlastnosti kapaliny a plynu. Zajišťuje vysoký jízdní komfort, a to na jakémkoliv povrchu, ať už se jedná o nerovné silnice či o průjezd terénem. Jeho konstrukce umožňuje udržovat stálou světlou výšku, a to bez ohledu na zatížení.

Právě z důvodu nekonvenčnosti tohoto řešení a možnosti navrhnout si vozidlo takto odpružené mě dané téma zaujalo a v rámci této práce se mu budu dopodrobna věnovat v jednotlivých kapitolách, jejichž obsah je popsán níže.

První kapitola má za úkol objasnit čtenáři historické pozadí systému. Je zde uvedeno, kým byl vyvinut společně s dobou, kdy byl tento převratný nápad představen veřejnosti. Dále je nutné popsat a ukázat původní podobu tohoto odpružení. Z ní pak totiž vychází všechna v současnosti používaná konstrukční řešení, která jsou na trhu dostupná. Ta jsou rozebrána v dalších částech práce.

Cílem druhé až šesté kapitoly je popis hydropneumatiky společně s vysvětlením funkce. V první řadě je nutné uvést pružicí a tlumicí vlastnosti. Jejich kombinace totiž dává za vznik principu, díky kterému celý systém funguje. Následně jsou zde uvedeny a detailně analyzovány jednotlivé komponenty, ze kterých se skládá. Použití dané konstrukce pérování přináší několik výhod, mezi ně patří například regulace úrovně odpružení a další speciální funkce, ty jsou v další pasáži zmíněny a objasněny.

Sedmá kapitola je zaměřena na konstrukční provedení systému a je vztažena k různým typům vozidel. Zahrnuje tedy řešení u osobních, nákladních a vojenských aut. Dále také u traktorů a návěsů. Z uvedených informací vyplývá, že škála použití je velmi rozmanitá.

V osmé kapitole pak následuje samotný návrh odpružení. Tato část je velmi podstatná, neboť umožňuje přenést teoretické poznatky získané v průběhu tvorby práce do praxe. Dle zadání je požadován návrh hydropneumatického odpružení u vojenského speciálního vozidla s pohotovostní hmotností kolem 10 tun.

Poslední kapitola obsahuje zhodnocení bakalářské práce s výsledky, kterých bylo v jejím průběhu dosaženo.

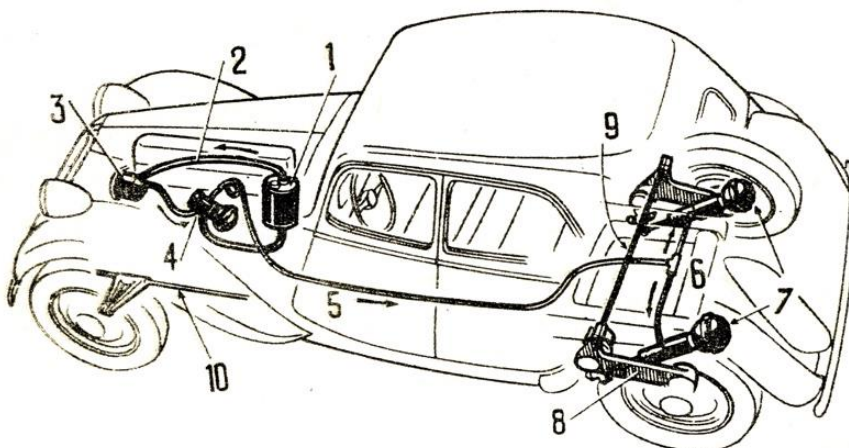
1 HISTORIE

Za vznikem hydropneumatického odpružení stojí osoba jménem Paul Magès, toho času zaměstnanec továrny, která se zabývá výrobou vozidel značky Citroën [1]. Sem byl přijat ve věku 17 let, kdy mu firma kladně odpověděla na jím odeslaný životopis. Během jeho působení u automobilky vystřídal postupně několik pozic. Začínal jako technická podpora, později překresloval návrhy a v roce 1942, byl výkonným ředitelem přidělen vývojovému oddělení, které se zabývalo problematikou systémů brzd a odpružení. Zde studoval dostupné materiály o způsobech pérování u automobilů.

Znepokojoval ho fakt, že přílišné odpružení je neslučitelné s dobrým ovládáním. Továrnou mu byl přiřazen úkol, aby vymyslel takový systém, který by kombinoval obě výše zmíněné vlastnosti. Uvědomil si, že řešení problému spočívá v návrhu variabilního odpružení s následující charakteristikou. Při nízkých rychlostech má být měkčí, naopak v případě vyššího tempa či většího zatížení tužší.

Tato myšlenka ho přiměla k řadě experimentů, jejichž výsledkem byl vývoj hydropneumatického systému. Princip tkví v kombinaci velmi nízké stlačitelnosti hydraulické kapaliny spolu se snadno stlačitelným plynem, obě média jsou od sebe oddělená membránou a jejich obalem je hydropneumatický zásobník, tzv. akumulátor. S přibývajícím zatížením vzrůstá tlak plynu a výsledné odpružení se stává tužším. Po náročném výzkumu Magès usoudil, že nejlepším řešením je kapalinu dodávat pod tlakem, který je produkován zařízením k tomu určeným. Je jím hydraulické čerpadlo.

Tento převratný nápad byl poprvé veřejnosti představen v roce 1954 [2]. Jako základ pro aplikaci tohoto nového typu odpružení posloužil již roky vyráběný Citroën 15CV, konkrétně jeho inovovaná verze s označením Six H. Hydropneumatika zde byla instalována pouze v případě zadní nápravy. Obsahuje nádrž s kapalinou (1), vedení kapaliny k čerpadlu (2), čerpadlo (3), regulátor tlaku (4), vedení natlakované kapaliny (5), rozvod kapaliny k jednotkám odpružení (6), zásobníky s válci (7), ramena (8) a stabilizační tyč (9) [3]. Došlo rovněž k prodloužení předních torzních tyčí (10) [2]. Výroba tohoto typu trvala poměrně krátkou dobu a s celkovým počtem přes tři tisíce kusů se z nich v dnešní době stala ceněná sběratelská rarita. Systém je znázorněn na obrázku níže.

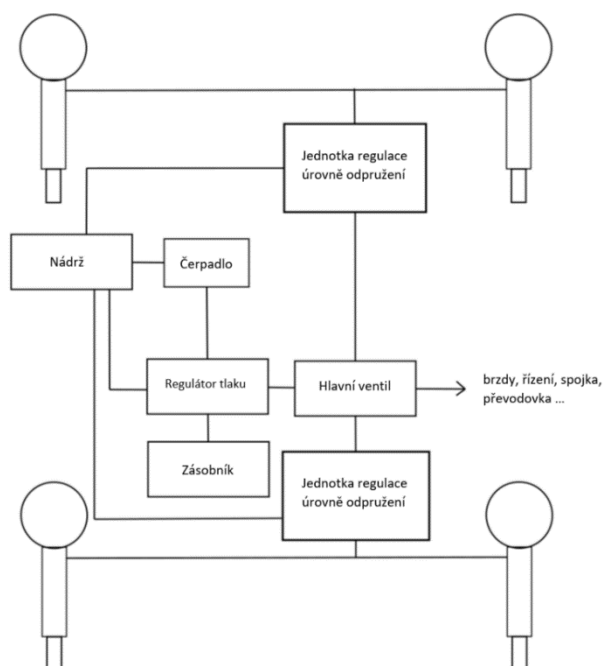


Obr. 1 Hydropneumatický systém odpružení vozidla Citroën 15CV Six H [3]

Nově představená verze automobilu zaujala dokonce tehdejšího prezidenta Francie. René Coty pověřil v roce 1955 francouzskou společností Franay, aby navrhla a postavila prezidentskou limuzínu právě s využitím mechanických částí modernizovaného modelu [4]. O rok později k ní přibyla ještě otevřená verze vládního automobilu opět s technickou podstatou v modelu Six H. Jako projektant a výrobce byla státními orgány vybrána firma Chapron.

Aplikace hydropneumatiky i u aut působících ve státní sféře jen potvrzuje úspěch Magèho nápadu.

Její další použití v komerčně dostupném automobilu na sebe nenechalo dlouho čekat, v roce 1955 sjíždí z výrobních linek vůz s futuristickým vzhledem, Citroën DS [5]. Jako nástupce modelu 15CV byl i u něj aplikován nově vymyšlený systém pérování a použití bylo rozšířeno i na přední nápravu. Hydropneumatická pružina se skládá z jednočinného válce, na kterém je ze shora namontován hydropneumatický zásobník [6]. Mezi těmito komponentami je umístěn průtokový odpor (viz. 4.3.2). Nutno dodat, že se jedná se o systém bez předpětí (viz. 3.1.1). Klopení je stabilizováno pomocí stabilizačních tyčí, kterými je opatřena přední a zadní náprava. Každé nápravě rovněž náleží jednotky regulující úroveň odpružení, ty jsou připojeny k centrálnímu hydraulickému systému, který dále napájí například brzdy, řízení, spojku či převodovku (viz. obr. 2).



Obr. 2 Schéma základního systému odpružení od Citroënu [6]

Použitím hydropneumatického odpružení vzniká zásadní problém, který je třeba brát v úvahu. Je jím tření vznikající v hydraulickém válci, které je v důsledku vysokých provozních tlaků vyšší než v případě běžně používaných tlumičů [6]. Vysoké tření totiž vede ke zhoršení reakce odpružení na malé, krátkodobé rázy. Citroën si s tímto nepříjemným problémem poradil pomocí následujících konstrukčních řešení.



Prvním je použití těsnicího systému s velmi malým třením, nevýhodou je únik kapaliny. Dlužno dodat, že je s ním počítáno a pro takto vyloučenou kapalinu jsou zkonstruované speciální kanály, kterými je dopravena do sběrné nádrže. Druhým konstrukčním prvkem, který automobilka pro eliminaci tření použila, je vysoká hodnota pákového poměru pro mechanické připojení hydraulického válce. Dojde tak ke snížení poměru třecích a pružných sil.

Podrobnější vysvětlení problematiky tření se nachází v pasáži věnované tlumení (viz. 3.2).

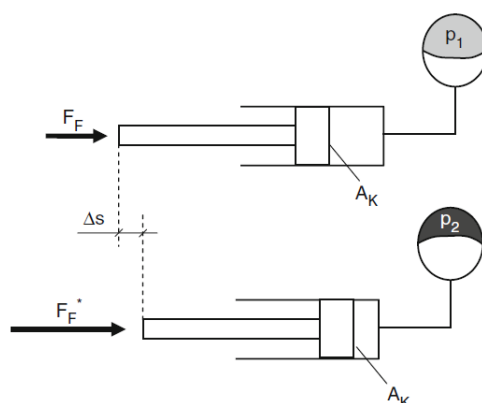
2 POPIS SYSTÉMU A PRINCIP FUNKCE

Nejjednodušší hydropneumatický systém je tvořen třemi základními prvky [6]. Skládá se z hydraulického válce, hydropneumatického zásobníku, který je na něm ze shora umístěn a z pracovní látky, kterou je hydraulická kapalina. V praxi však existují případy, kdy je nutné první dva výše zmíněné prvky od sebe oddělit. Důvodem pro takovou konstrukční změnu mohou být například prostorové požadavky. Tato úprava je možná, nutné je však zabezpečit průtok kapaliny mezi nimi. K tomuto účelu slouží instalace potrubí a armatur.

Podrobný popis výše jmenovaných komponentů je náplní 4. kapitoly a princip funkce systému je vysvětlen v následujícím odstavci.

Podmínkou pro správnou funkci je fakt, že vnější pružná síla (označena jako F_F) působící na pístnici, musí být v rovnováze se silou, která je dána tlakem p_1 a plochou pístu A_K . Tento předpoklad je platný v případě, dojde-li k zanedbání setrvačnosti a tření. Zvýší-li se velikost síly F_F na hodnotu F_F^* , změní se poloha pístu o rozdíl Δs . Z toho důvodu se do zásobníku začne přemísťovat hydraulická kapalina, a to až do doby, než tlak v zásobníku nedosáhne úrovně, která opět zabezpečí stabilitu systému (tlak p_2).

Tato rovnováha sil je základem pro funkci a pochopení systému odpružení.



Obr. 3 Schéma principu funkce odpružení [6]

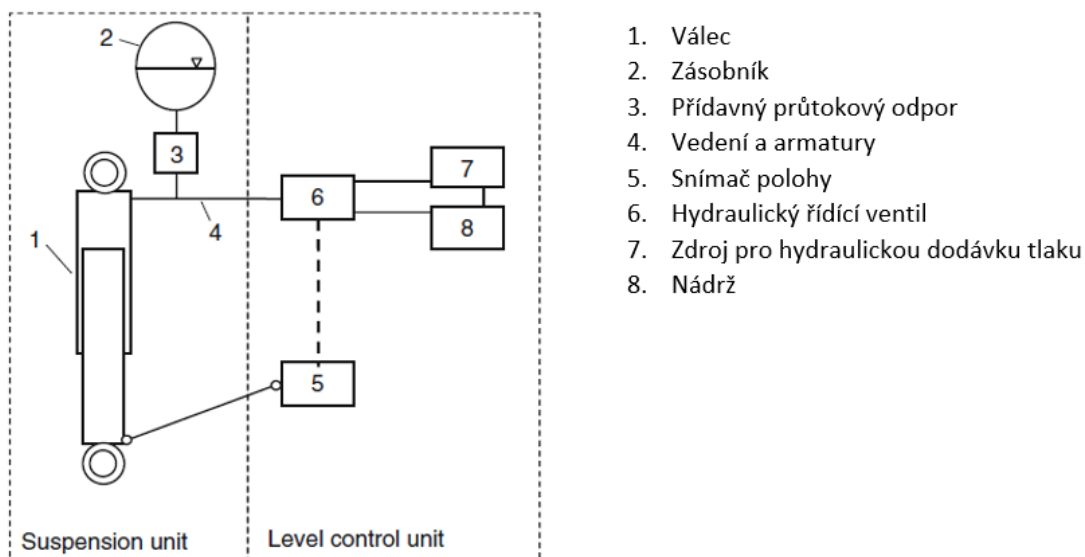
Pro umožnění dodatečného tlumení je umístěn mezi válec a zásobník tzv. přídavný průtokový odpor [6]. Slouží k přeměně části kinetické energie hydraulické kapaliny v teplo (jedná se o viskózní tření). Tím je zajištěno požadované tlumení, které je však kombinováno s nežádoucí třecí silou způsobenou těsníci a vodícími prvky válce.

Hydraulický válec, hydropneumatický zásobník, kapalina a přídavný průtokový odpor dávají za vznik celku, který lze nazvat jako **jednotka odpružení**. Ta, jak název napovídá, zabezpečuje funkci pérování.

Výše popsany systém tedy slouží jako plnohodnotná náhrada za všeobecně známou kombinaci pružiny a tlumiče. Neobsahuje však doplňkovou komponentu, která jej dělá výjimečným a ve které spočívá jedna z jeho hlavních výhod. Je jí jednotka sloužící k regulaci úrovně odpružení. Slouží k zajištění stabilní světlé výšky vozidla, a to bez ohledu na zatížení (vyjádřeno silou F_F). Skládá se ze čtyř prvků, a to sice ze snímače polohy, hydraulického řídicího ventilu, zdroje pro

hydraulickou dodávku tlaku a nádrže. Princip funkce je následující. Snímač polohy posílá buď přímo, nebo prostřednictvím elektronické řídicí jednotky signály hydraulickému řídicímu ventilu. Jeho reakcí je změna množství hydraulické kapaliny v jednotce odpružení tak, aby došlo k návratu do její původní polohy, je-li to nutné. Pokud se objem kapaliny zvýší, dojde ke zvýšení světlé výšky vozu. Naopak sníží-li se objem kapaliny, světlá výška vozidla klesne.

Systémy pro regulaci úrovně odpružení jsou popsány v 5. kapitole.



Obr. 4 Zleva: jednotka odpružení, jednotka pro regulaci úrovně odpružení [6]

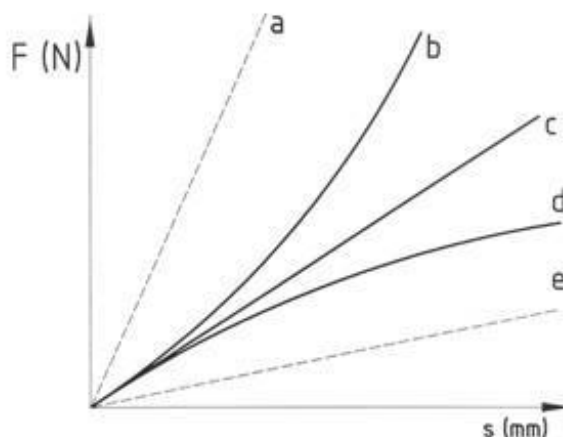
3 PRUŽÍCÍ A TLUMÍCÍ CHARAKTERISTIKY

Jak je zmíněno v úvodu, kombinace pružení a tlumení zajišťuje celkovou funkci odpružení. Pro pochopení je tedy nasnadě rozdělit obě charakteristiky a každé z nich věnovat vlastní podkapitolu.

3.1 PRUŽENÍ

Tato podkapitola je rozdělena na dvě části. Její první část se zabývá tuhostí a ve druhé sekci jsou popsány jednotlivé druhy systémů. Ty jsou rozděleny v závislosti na předpětí a seřazeny dle složitosti provedení.

O tuhosti již padla zmínka v úvodu kapitoly 3. Vycházíme z grafu charakteristiky pružiny. Tu znázorníme jako křivku vyjadřující závislost mezi silou působící na pístnici, která je umístěna ve válci, a posunem pístnice. Poměr síly a posunu udává výslednou tuhost.



Obr. 5 Charakteristika pružin [7]

Nutno dodat, že v případě hydropneumatického odpružení je charakteristika progresivní (na obr. 5 křivka b). [7]

Měření se provádí při odpojeném průtokovém odporu [6]. Je důležité připomenout si, že zvýšení síly působící na válec vede ke zvýšení tlaku a z toho důvodu pak dojde ke změně polohy pístnice. Děje se tak z důvodu stlačení plynu v zásobnících, stlačením kapaliny a rozšířením (nedokonale tuhých) potrubí a armatur pro vedení kapaliny. Všechny tyto jevy vyvolají samostatnou tuhost.

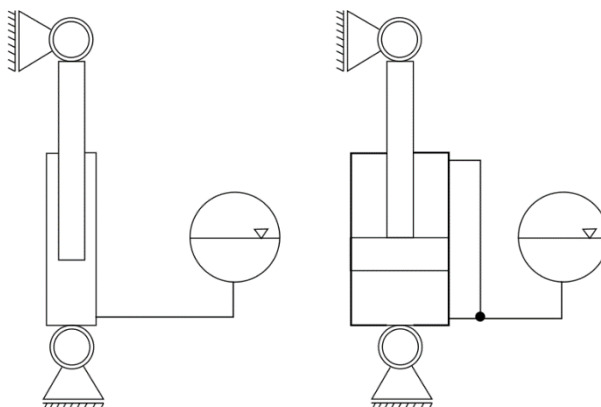
Je třeba mít na paměti, že tuhost, která byla zjištěna postupem uvedeným na začátku této podkapitoly, zastupuje kombinaci tuhostí těchto tří jevů.

3.1.1 DRUHY SYSTÉMŮ

Systémy lze na základě jejich konstrukčního provedení rozčlenit na několik typů.

HYDROPNEUMATICKÉ ODPRUŽENÍ BEZ PŘEDPĚTÍ

Systém se skládá ze dvou komponent. První komponentou je zásobník a druhou je hydraulický válec. Ten může být navržen buď jako jednočinný, opatřený pouze jedním vstupem pro kapalinu, což má za následek jednosměrnou funkci [8]. Návrat do původní polohy je následně realizován působením vnější síly. Zástupcem může být například plunžrový válec. Druhým typem je válec dvojčinný, opatřený dvěma vstupy, z čehož plyne, že pracuje obousměrně. Je schopen poskytnout větší tlumení odskoku [6]. Používá se typ, kdy je propojená oblast činnosti pístu s prostorem pístnice (viz. obr. 6).



Obr. 6 Systémy bez předpětí (plunžrový válec vlevo, dvojčinný válec vpravo) [6]

Největší míru uplatnění nachází systém u traktorů, teleskopických manipulátorů a nakladačů, kde je využíván k odpružení výložníku. Tím dochází ke zlepšení manipulace s nákladem. Odpružením je eliminován přenos rázů od samotného nakladače i nákladu, který může být umístěn na přídatném zařízení (například nakládací lžice či paletizační vidle) [9].

Provedení je opět jednoduché. Systém se skládá z válce, kde je oblast činnosti pístu spojena se zásobníkem.

V praxi tento systém využívá například firma STOLL a nese název Comfort-Drive. Zásobník se nachází pod ramenem výložníku a na přívodu kapaliny je opatřen ventilem, jehož otočením lze odpružení jednoduše zablokovat.



Obr. 7 Odpružení čelního nakladače (foto autor)



Obr. 8 Detail umístění zásobníku (1- zásobník, 2- ventil, 3- rameno výložníku, 4- vjezdový sloupek) [9]

Další případ, kdy je systém aplikován v praxi, je odpružení kabiny traktoru. Příčinou použití je zvýšení komfortu obsluhy stroje. Konkrétním strojem, kde byl využit, je stroj John Deere řady 6020 [10]. Pro takovou aplikaci je zvolen dvojčinný válec, kde je oblast činnosti pístu propojená s prostorem pístnice (viz. obr. 9) [6].



Obr. 9 Detail odpružení kabiny (HCS by John Deere) [11]

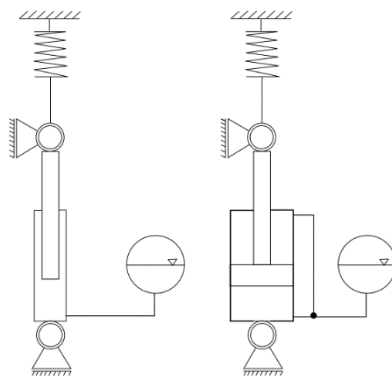
Systém bez předpětí je využíván i v případě odpružení u automobilů, konkrétně se jedná o vozy značky Citroën a nazývá se Hydractive. Jeho podrobnému popisu je věnována podkapitola 7.1.1.

SYSTÉMY S MECHANICKÝM PŘEDPĚTÍM

Důvodem pro zkonstruování tohoto systému byla snaha snížit kvadratickou závislost tuhosti pružiny na jejím statickém zatížení [6]. Toho je dosaženo navázáním dodatečného vnitřního předpětí k hydropneumatické pružině. V případě jednočinného válce je vyvoláno pomocí dodatečné pružiny, ta musí být schopna zvládnout celý zdvih. Tuto metodu lze aplikovat i u dvojčinného válce, avšak ten je vhodnější využít v systému s hydraulickým předpětím. Předpětí

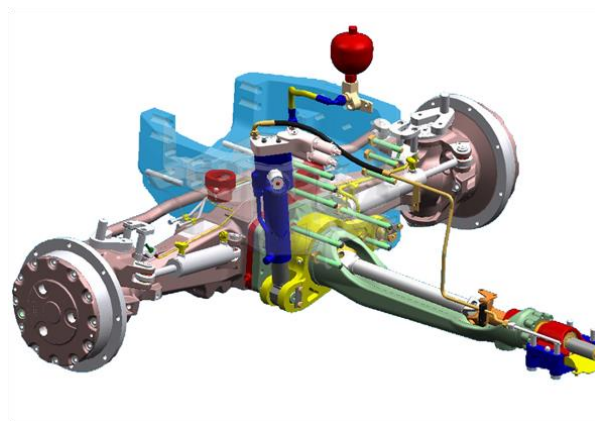
je aktivní i v případě, že na systém nepůsobí žádné vnější zatížení a lze jej tedy brát jako základní zatížení, přičemž všechny ostatní vnější zatížení se k němu vážou.

Dojde-li tedy ke změně vnějšího zatížení, pak změna zatížení pružiny je nižší než v případě systému bez předpětí.



Obr. 11 Systémy s mechanickým předpětím [6]

Používá se k odpružení přední nápravy u traktorů. Jedná se například o systém od firmy Carraro a používají ho společnosti Claas, Case, Steyr, Massey Fergusson a Landini.



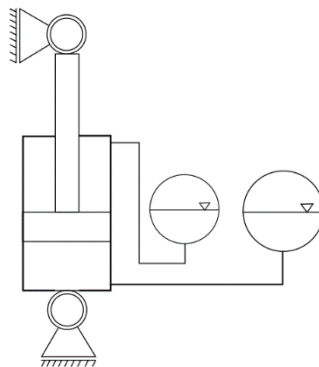
Obr. 10 Přední náprava modelové řady Case Puma [12]

SYSTÉMY S KONSTANTNÍM HYDRAULICKÝM PŘEDPĚTÍM

Jak bylo uvedeno v předchozí části, předpětí lze vyvolat mechanicky, pomocí pružiny. Nevýhodou její aplikace jsou však velké prostorové nároky. V praxi se jistě lze setkat s takovými případy, kdy je pro její zástavbu místa dostatek. Pokud má konstruktér k dispozici pouze omezený prostor, řešením je právě systém s hydraulickým předpětím [6].

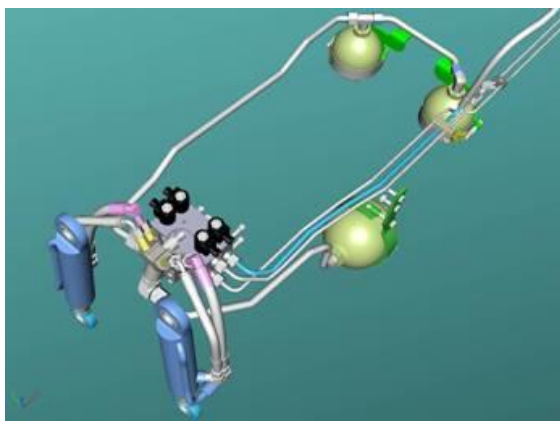
K jeho vyvolání je zapotřebí dvojčinného válce, neboť je k dispozici další prostor pístnice potřebný k vytvoření přídavné předepjaté pružiny. Tohoto je dosaženo stlačováním komory pístnice. Tím vzniká síla, která působí jako předpětí. Je třeba uvědomit si, že pokud se komora

pohybuje, je nutno zajistit odvod a přívod uvolňované a stlačované kapaliny. Prostor pístnice tak musí být spojen se zásobníkem, který kapalinu buď uvolňuje nebo ji v sobě kumuluje v závislosti na smyslu pohybu. Schéma systému je přiloženo pod textem.



Obr. 12 Systém s hydraulickým předpětím [6]

Používá se stejně jako přechozí systém k odpružení přední nápravy u traktorů. Dvě nejznámější firmy, které ho pro tento účel využívají, jsou výrobci techniky John Deere (TLS I) a Fendt.



Obr. 13 Schéma odpružení přední nápravy TLS [13]

SYSTÉMY S VARIABILNÍM HYDRAULICKÝM PŘEDPĚTÍM

Jedná se o další vývojový stupeň v porovnání s ostatními systémy. Základní úvaha vychází z poznatku, že je možné měnit předpětí, a tudíž i tuhost, změnou tlaku předpětí [6]. Z toho plyne, že je možné ovlivnit pružící charakteristiky, což se jeví jako výhodné, neboť díky tomu lze měnit charakter odpružení v závislosti na jiných parametrech. Těmi mohou být například statické zatížení pružiny a další provozní parametry, a to v otevřené nebo uzavřené smyčce. Nutno zmínit, že u systémů s otevřenou smyčkou je vstup nezávislý na výstupu. Naopak v případě systémů s uzavřenou smyčkou je vstup závislý na výstupu.

V praxi je možno se s takovým systémem setkat v případě odpružení přední nápravy traktoru. Jedná se o řešení nazývané TLS II, se kterým přišla na trh společnost John Deere. Obsahuje

dvoustupňové nastavení tuhosti pružiny, které je závislé na jejím statickém zatížení. Nastavení je umožněno z důvodu použití tlaku v komoře pístu jako vstupního parametru pro řízení tlaku předpětí v prostoru pístnice. Tlak v komoře pístnice je nastaven jako vysoký v případě, když se tlak v pístové komoře pohybuje pod stanovenou mezní hodnotou. V opačném případě, pokud je tlak nad stanovenou mezí, je tlak v komoře pístnice nastaven jako nízký.



*Obr. 14 Detail odpružení TLS II
[14]*

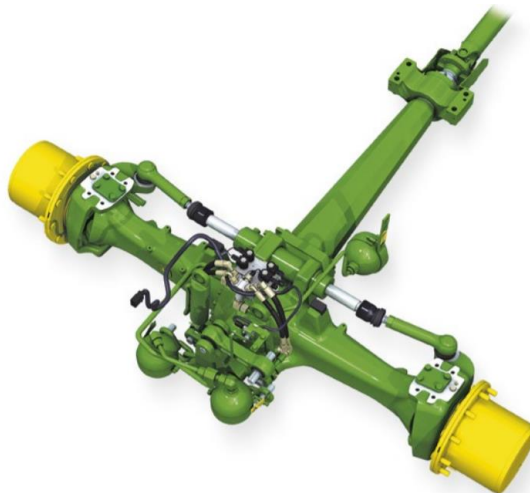
Vyšší hodnota tlaku v oblasti pístnice pro nízké tlaky v komoře pístu způsobuje zvýšení tuhosti při malém zatížení přední nápravy. Nastavování tlaku v komoře pístnice se děje pouze v důsledku použití hydraulických komponent, pomocí tlakového spínacího ventilu a přepínacího tlakového regulačního ventilu.

V předchozím textu jsou zmíněny systémy s otevřenou či uzavřenou smyčkou. V případě druhého systému, uzavřená smyčka řídící tlak v oblasti pístnice zajišťuje možnost přizpůsobení pérování různým provozním podmínkám. Pro tento účel musí být provozní parametr brán jako vstupní proměnná. Jedná se o pomyslné měřítko komfortu odpružení. Pokud dojde k jeho zhoršení, například v důsledku nerovné vozovky, je tato změna detekována a systém tuhost pružiny nastaví na takovou úroveň, která mu napomůže vrátit se do původního stavu. To je důvod, proč musí být provozní parametr vstupní proměnnou.

Výše popsané konstrukční řešení lze chápat jako přechod od pasivního systému odpružení, přestože může disponovat regulací úrovně, k adaptivnímu systému.

Aby mohla uzavřená smyčka řídit tlak v oblasti pístnice, je zpravidla nutné zakomponovat do systému elektroniku. Řídící jednotka je schopna sledovat více vstupních proměnných a v závislosti na nich nastavit systém co nejlépe. Toho je dosaženo přepínáním hydraulických válců a umožněním kapalině téct dovnitř a ven z hydraulických jednotek odpružení (především části náležící oblasti pístnice). Takový systém v sobě skýtá celou řadu nastavení a z toho vyplývajících různých hodnot tuhostí, a to zejména díky zásobníkům. Je nutné připomenout, že se jedná o formu adaptivního systému, snadno se tak přizpůsobí změnám (např. zatížení) a různým provozním podmínkám. Lze ho použít univerzálně v případě různých platforem s minimem změn. Ty se zpravidla týkají pouze softwaru, popřípadě mírného zásahu do samotné konstrukce odpružení. Systém využívá například společnost John Deere k odpružení přední nápravy.

„Samovyrovnávací odpružení TLS Plus automaticky upravuje citlivost a míru odpružení a synchronizuje ji s čidly tříbodového závěsu za účelem kompenzace svislého kmitání při tažení těžkých náradí“. [15]



*Obr. 15 Náprava se systémem odpružení TLS Plus
[15]*

3.2 TLUMENÍ

Princip spočívá v použití prvků, které jsou schopny transformovat kinetickou nebo potenciální, případně obě formy energie, na teplo [6]. Obvykle k přeměně dochází aplikací zpoždovací síly, která působí při pohybu prvků odpružení a je nejčastěji založena na principu tření. energii přenášenou do odpružení vnějšími vlivy je totiž zapotřebí rozptýlit, aby došlo k rozložení výsledné amplitudy a též k zabránění zvyšování amplitud kmitání, jejichž nárůst je způsoben rezonancí.

Obecně jsou rozlišovány dva základní principy, které tlumení vytváří.

3.2.1 TLUMENÍ ZPŮSOBENÉ SMYKOVÝM TŘENÍM

Ke vzniku smykového tření dochází v případě, že se jedno těleso posouvá neboli smýká, po povrchu druhého tělesa [16]. Je zpravidla vyvoláno nerovností obou styčných ploch. Platí, že mezi pohybujícím se tělesem a podložkou vzniká síla normálová (označuje se jako F_n). Samotným pohybem je potom vyvolána síla kolmá na sílu normálovou. Je označována jako třecí síla a její směr míří vždy proti směru pohybu tělesa. Jsou-li tyto poznatky aplikovány na problematiku odpružení, je patrné, že třecí síla má význam síly tlumící.

Smykové tření lze rozlišit na tření statické (klidové) a tření kinematické (za pohybu).

V případě **statického tření** nedojde na styčné ploše k pohybu, dokud tažná síla nepřekročí určitou hodnotu síly, která je označována jako mezní síla statického tření F_o [17]. Jakmile je velikost tažné síly rovna velikosti F_o , dojde k pohybu. Hodnota F_o je dána součinem činitele klidového tření f_o a normálové síly F_n . Činitel klidového tření je především závislý na materiálu styčných ploch.

Mezní síla statického tření vyjadřuje parametr určující minimální úroveň buzení, pod kterou systém odpružení nemůže pohlcovat a snižovat rázy [6]. To znamená, že podněty z okolí jsou pouze přenášeny mezi neodpruženou a odpruženou hmotou. Nutno zmínit, že úroveň statického tření má velký vliv na charakteristiku odpružení. Ta vyjadřuje skutečnost, zda systém citlivě reaguje na sebemenší podněty z okolí nebo zda jsou podněty vedeny neelasticky až k řidiči.

Hlavním místem, kde vznikají mezní síly statického tření, jsou elastomerová těsnění. Zvláště, pokud je systém delší dobu mimo provoz, pak tyto síly mohou dokonce vést k poškození těsnění. Na závěr je vhodné uvést, že statické tření nepřispívá k tlumení, neboť působí pouze po dobu, kdy nedochází k pohybu.

Jakmile dojde k překročení mezní síly statického tření, nastává **tření kinematické** [17]. Tělesa se po sobě začínou smýkat. Vzniká tak třecí síla F_t , která je rovna součinu normálové síly F_n a činitele smykového tření f . Ten je závislý především na materiálu styčných ploch. Kvůli rozdílnosti tažné síly a třecí síly se kinetická energie přeměňuje na teplo a je tudíž odváděna ze systému odpružení [6].

Smykové tření lze nalézt ve všech systémech odpružení, kde působí v ložiskách. Ty jsou nutné pro zajištění potřebného zdvihu. Tření se také vyskytuje v hydraulických válcích, kde je způsobeno těsníci a vodíci prvky. Lze snížit mj. vhodnou volbou geometrie válce, geometrie těsnění a materiálu, ze kterého je vyrobeno. Dále pak také správným tlakem v systému odpružení. Zde se nabízí jednoduchá úvaha, čím větší je průměr zvoleného těsnění, tím větší je délka hrany těsnění a vznikají tak vyšší třecí síly.

3.2.2 TLUMENÍ ZPŮSOBENÉ VISKÓZNÍM TŘENÍM

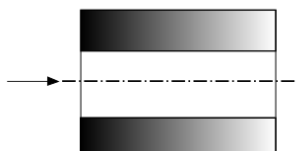
V předchozím textu padla zmínka o použití přídavného průtokového odporu, a to v souvislosti s viskózním třením. Je tedy na místě věnovat se právě principu jeho funkce. Jak název napovídá, jedná se o prvek, který je umístěn v proudící hydraulické kapalině. Dochází k přeměně kinetické energie na teplo, vlivem smykových toků uvnitř kapaliny [6]. Ta proudí z důvodu přenášení tlaku mezi aktivní oblastí pístu (umístěného v hydraulickém válci) a zásobníkem. Pohybem pístu je píst posouván a kapalina proudící mezi válcem a zásobníkem střídá pravidelně směr toku. Přídavný průtokový odpor způsobí tlakovou ztrátu, která vyvolá pomocí aktivních oblastí pístu sílu, která působí proti pohybu pístu. Síla tedy odvádí energii z kmitání a stává se tak silou tlumící.

Je důležité poznamenat, že tlaková ztráta závisí velkou měrou na objemovém průtoku průtokovým odporem. Zde vzniká odlišnost tlumící síly způsobené viskózním třením od tlumící síly vyvolané smykovým třením. První jmenovaná síla totiž značně závisí na rychlosti pohybu pístu.

Přídavné průtokové odpory lze rozdělit na dva základní typy, které se od sebe liší tím, že vykazují odlišné charakteristiky závislé na tlakové ztrátě a objemovém toku.

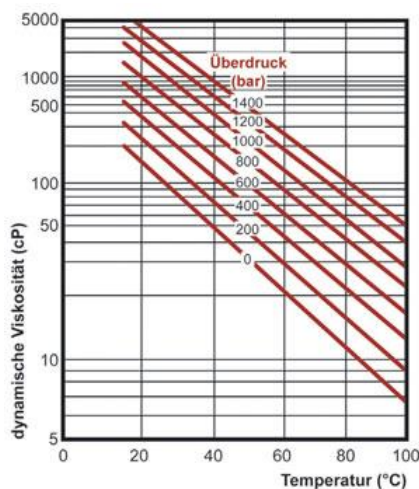
ŠKRTICÍ KLAPKA

Jedná se tedy o typ přídavného průtokového odporu. Průtok hydraulické kapaliny je zpomalován přechodem průtokového průřezu (obvykle kruhového tvaru) ze širokého na úzký a zpět na široký [6]. Z hydrodynamického paradoxu vyplývá, že s menším průřezem se zvyšuje rychlost proudící kapaliny, naopak klesá velikost tlaku. Dochází k vysokým tlakovým ztrátám, které jsou úměrné objemovému toku.



Obr. 16 Schéma škrticí klapky [6]

V případě škrticí klapky je také přímá závislost tlakových ztrát na viskozitě hydraulické kapaliny [18]. Nutno poznamenat, že viskozita kapaliny klesá s rostoucí teplotou, což je velmi nepříznivé [6]. Avšak pozitivní je zjištění, že s rostoucím tlakem, který je vyvolán vyšším zatížením, se viskozita zvyšuje. Dojde k vyšší tlakové ztrátě, která má za následek vyšší tlumení.



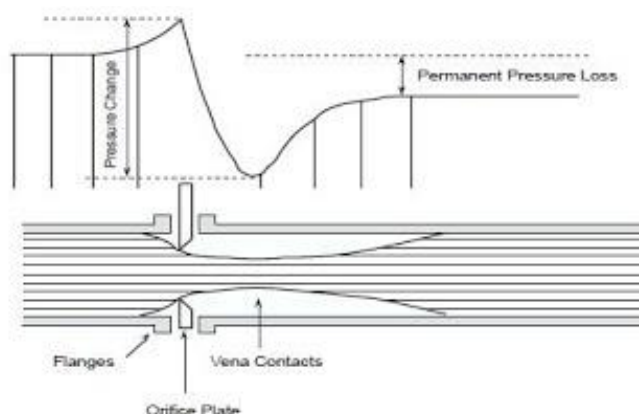
Obr. 17 Graf závislosti viskozity na teplotě, tlaku [18]

Hydraulické komponenty s charakterem škrticí klapky jsou potrubí, hadice, hadicové armatury. Nesmí však být opatřeny těsnými ohyby, otvory s konstantním průměrem v řídicích blocích, stejně tak jsou nepřipustná přímá potrubí opatřená konstantním vnitřním průměrem.

TRYSKA

V případě tohoto prvku je proudící hydraulická kapalina vystavena jednomu, či několika náhlým krátkým přechodům ze širokého průřezu na úzký nebo naopak [6]. Zatímco v místě před tryskou se tlak lehce zvyšuje, při průtoku kapaliny tryskou prudce klesá až do svého minima (místo s názvem „vena contracta“), ve kterém je rovněž maximální rychlost průtoku

[19]. Následně se začne tlak zvyšovat, neboť se sníží rychlost proudící kapaliny. Tlaková ztráta je pak určena nejen samotným charakterem trysky, ale i faktem, že část energie proudu kapaliny se transformuje na teplo v důsledku vnitřního viskózního tření a turbulencí, která vznikne náhlou změnou průřezu. Zmíněná přeměna má za příčinu vznik tlumení. V porovnání se škrtkou klapkou je zde jen krátký přechod. Z tohoto důvodu nezávisí v ideálním případě tento typ odporu na viskozitě hydraulické kapaliny, a tudíž i na teplotě [6]. Nutno zmínit velmi silnou reakci tohoto typu odporu na silné buzení, způsobené např. průjezdem přes výmol. Dojde k vyvolání velké tlumicí síly a vznikne tak silný otřes působící na odpruženou hmotu. Dalším charakteristickým rysem je slabé tlumení oscilací s malými amplitudami. Vzniká tak dlouhá doba zpětné odezvy, která, speciálně u odpružení náprav, vyvolá v řidiči pocit, že nemá plnou kontrolu nad vozidlem.



Obr. 18 Tlaková ztráta vyvolaná pomocí trysky [19]

Hydraulické komponenty s charakterem trysky jsou zpravidla součástí, u kterých dochází ke změně směru toku, zvláště pak, pokud mají malý poloměr zaoblení (například kolena). Další použití je u komponent s náhlými změnami v průřezu, např. otvor ve stěně válce pro připojení oblasti činnosti pístu/ oblasti pístnice. Další použití může být u armatur s velkou změnou velikosti na výstupech pro připojení.

Nutno dodat, že v praxi se lze nejčastěji setkat s kombinací obou typů odporů.

Nakonec je zapotřebí zmínit se o speciálních přídavných průtokových odporech. Jedná se o kombinaci jednoho z výše uvedených typů odporu a redukčního ventilu. Poskytují silné základní tlumení, a to už od nízkých rychlostí pístu. Silné tlumení je výhodné zejména v případě odpružení náprav či kol. Poskytuje totiž velice dobrou zpětnou vazbu od odpružení k řidiči. Ventil je zde z důvodu eliminace extrémních tlumících sil při vysoké rychlosti pístu. Otevírá se v případě velkých tlakových rozdílů, udržuje tak tlakovou ztrátu na přijatelné úrovni z hlediska komfortu.

3.2.3 DORAZY

Je důležité mít na paměti, že každý systém odpružení má k dispozici pouze omezený zdvih. Čím je nastaveno měkčí odpružení, tím se sníží rázy působící na odpruženou hmotu [6]. Samotné vnější okolnosti (buzení), mohou být dle stavu povrchu vozovky různé. Extrém pak nastane, pokud bude některý ráz natolik velký, že posunutí pístu přesáhne maximální zdvih daný konstrukcí a píst se zastaví až v koncové poloze. Dojde tak ke vzniku krátkých velkých sil a rázů, které sníží pohodlí posádky. Může také dojít např. k přetížení komponent odpružení.

Nabízí se tak způsob, jak tuto nepříjemnost vyřešit. Spočívá v naladění hydropneumatické pružiny na takovou úroveň, kdy posunutí pístu vyvolané extrémními podmínkami nikdy nedosáhne koncových poloh. Je důležité si uvědomit, že extrémních rázů je vzhledem k těm „běžným“ podstatně méně. Vhodnějším způsobem se jeví nalézt pomyslný kompromis v nastavení systému. To znamená, že při ladění pérování je počítáno s tím, že píst koncových poloh v extrémních případech může dosáhnout, avšak v normálních provozních podmínkách bude komfort na vysoké úrovni. Přitom se bere v potaz očekávaná frekvence a buzení vnějšími vlivy při provozu.

Aby v případech dosažení pístu koncových poloh nebyly vzniklé rázy tak velké, musí být aplikován doraz. Pomocí něj je vytvořena dodatečná zpomalovací síla, která působí na píst v okamžiku, kdy se přibližuje ke koncové poloze.

Jedna s možností, jak doraz realizovat, je použití elastomerových prvků [6]. Tato metoda je oblíbená u velkého množství systémů odpružení. Zde je tedy zpomalovací síla vyvolána kontaktem pístu s elastomerovou pružinou. Ta se stlačuje s tím, čím blíže je píst koncové poloze.

U hydropneumatického odpružení se však spíše využívá možnost hydraulického dorazu. Konstrukční úprava spočívá ve zúžení dutiny vedoucí olej z válce. Dojde-li ke stlačování, komora pístu je aktivní, zatímco při odskoku je aktivní komora pístnice pro tlumení konce zdvihu. Dojde ke snížení tlakové ztráty přes průtokový odpor, zvýší se tak tlak v příslušné komoře válce. Tomuto dodatečnému tlaku je vystavena aktivní oblast příslušné komory válce a dochází ke vzniku tlumící síly.

3.3 KOMBINACE PRUŽENÍ A TLUMENÍ

V předchozích kapitolách jsou zmíněny a popsány charakteristiky pružení a tlumení. Je tedy nutné zkombinovat je, čímž vznikne základ systému hydropneumatického odpružení. Jeho popis nejlépe vystihuje křivka závislosti síly na posunutí. Je dána kombinací křivek pro plynovou pružinu, pro smykové tření a pro viskózní tření [6]. Je-li to nutné, přidává se ještě křivka dorazu.

Systém složený z těchto tří hlavních křivek je nazýván jako hydropneumatický systém odpružení bez předpětí. Působí u něj smykové tření a je opatřen jednoduchou škrticí klapkou pro zajištění viskózního tření.

4 JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY

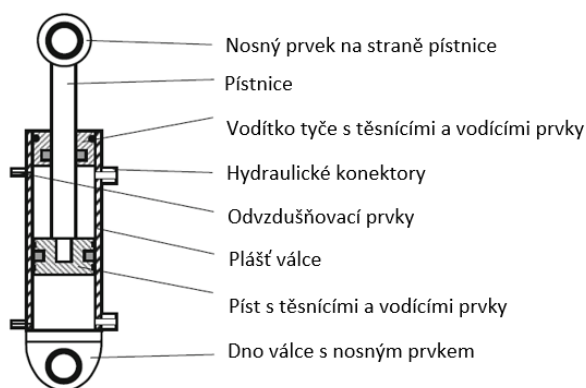
V předchozích částech práce jsou často zmiňovány jednotlivé komponenty, které tvoří hydropneumatický systém. Jejich podrobnému popisu je věnována právě tato kapitola.

4.1 HYDRAULICKÉ VÁLCE

Jedná se o nosné prvky v systému odpružení, neboť slouží k přenosu sil mezi neodpruženou a odpruženou hmotou [6]. Udržují tak hmotu působící na systém v předem určené poloze. Hydraulický válec také umožňuje samotný pohyb odpružení. Tímto pohybem musí být zajištěno jak efektivní tlumení rázů, tak schopnost udržet kmitání neodpružených částí na co nejnížší úrovni [20].

Primárně je válec navržen tak, aby na něj působily pouze tlakové síly v jeho podélné ose [6]. Ty účinkují na jeho aktivní oblast, tedy na povrch pístu. Ojediněle mohou nastat případy, kdy je válec vystaven navíc působení příčných sil a torzních momentů, například je-li upevněn k rameni. Takové namáhání však může vést k jeho poškození a omezení funkce odpružení v důsledku vysokého tření, proto musí být vymyšleno dodatečné konstrukční řešení v systému zavěšení, které omezí riziko poruchy na minimum.

4.1.1 DETAILNÍ POPIS VÁLCE



Obr. 19 Schéma válce [6]

Jak je znázorněno na obrázku, hlavním prvkem válce je samotný plášť, neboť kromě pístnice jsou s ním spojené všechny ostatní součásti. Na jednom konci se nachází dno válce, které přenáší síly od zavěšení. Dále je opatřeno nosným prvkem s montážním otvorem, který zpravidla obsahuje ložisko (např. kluzné). Na druhém konci pláště se nachází vodítko tyče. To zajišťuje vedení další součásti válce: pístnice, která je vybavena opět nosným prvkem na jedné straně pro přenos sil působících na tomto konci, přičemž na druhé straně je k ní připojen píst. Nutno také zmínit těsnící prvky, ty jsou instalovány mezi vodítko a pístnici, a to mj. z důvodu eliminace nečistot z okolí. Dále se také nacházejí mezi pláštěm a pístem, kde slouží k utěsnění komory pístnice a pístu. Kromě těsnění je válec opatřen také vodícími prvky. Ty přenáší boční síly mezi pístem a vnitřní částí pláště tak, aby bylo dosaženo co nejnížšího tření a boční vůle.

Dále také zabraňují kontaktu kov na kov, mezi pláštěm a pístem. Vzniká tak mezera, která je vyplněna těsnícím prvkem. Další vodící prvky se pak mohou nacházet mezi pístnicí a vodítkem.

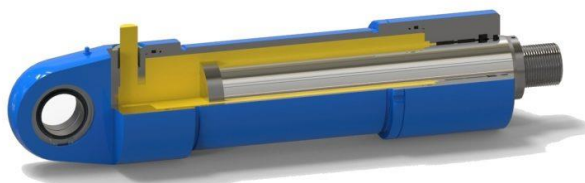
Nelze také opomenout hydraulické konektory, tedy místa, která zajišťují přívod a odvod kapaliny. Mohou být umístěny buď v plášti, nebo také na dně válce či ve vodítku pístnice [6]. Posledními součástmi jsou pak odvzdušňovací prvky. Zbytkový vzduch v kapalině vede ke zhoršení funkce odpružení, je tedy žádoucí ho odčerpát. Ideální poloha otvorů pro odvzdušnění je v nejvyšším a nejnižším místě válce. Doplnkovými prvky mohou být například příruby pro přímou montáž zásobníků k válci, snímače, dorazy apod.

4.1.2 TYPY VÁLCŮ

Válec lze klasifikovat podle principu jejich funkce a též podle samotné konstrukce.

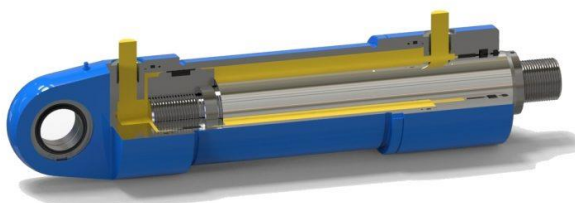
DĚLENÍ DLE PRINCIPU FUNKCE

Pro systémy s nízkým statickým zatížením pružiny či s mechanickým předpětím lze použít tzv. jednočinný válec [6]. Ten může být navržen buď jako plunžrový válec, pro malé tlumení odskoku, či válec opatřený pístem a pístnicí (obdoba diferenciálního válce, opatřen však pouze jedním hydraulickým konektorem). Jejich výhodou jsou nízké výrobní náklady a vysoká bezpečnost pro namáhání na vzpěr. Nevýhodou je vyšší hmotnost a větší objem neodpružené hmoty.



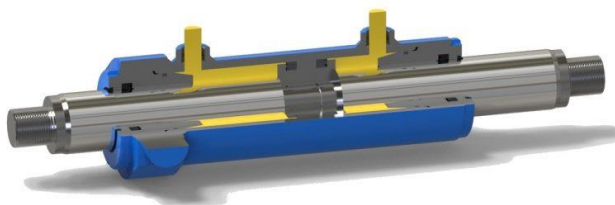
Obr. 20 Jednočinný válec plunžrový [21]

Pro vyšší tlumení odskoku je vhodné aplikovat dvojčinný válec, který se dále dělí na diferenciální a stejnohodý. Diferenciální typ nachází obvykle uplatnění u systémů s hydraulickým předpětím, kde je vystaven velkým změnám zatížení.



Obr. 21 Dvojčinný diferenciální válec [22]

Naopak stejnohodý válec se v systému odpružení vyskytuje spíše výjimečně. Lze se s ním setkat např. v aplikacích, kde je požadována samostatná stabilizace klopení. Nevýhodou jsou pak vyšší výrobní náklady než v případě jednočinného válce.



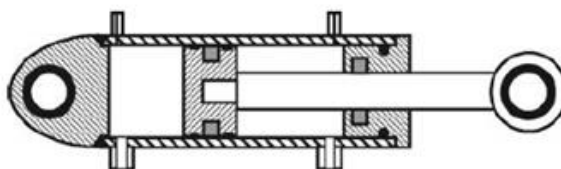
Obr. 22 Dvojčinný stejnohodý válec [23]

DĚLENÍ DLE KONSTRUKČNÍHO HLEDISKA

Z hlediska konstrukčního provedení je možné válce rozdělit na:

I. Svařované a šroubované

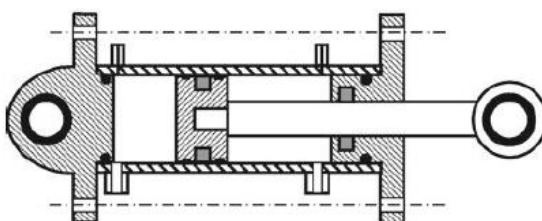
Jak název napovídá, dno válce je k plášti přivařeno, zatímco vodítko tyče (nejedná-li se o plunžr) je k němu přišroubováno. Takové řešení vyniká zejména svojí robustností a schopností odolávat velkým silám v podélném i bočním směru [6]. Zástavba do systému odpružení je spojena s nízkými prostorovými nároky.



Obr. 23 Válec šroubovaný, svařovaný [6]

II. Svorníkové

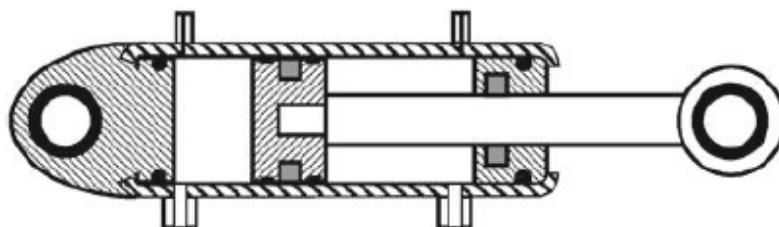
V tomto případě jsou součásti, mezi ně patří dno válce, plášť a vodítko, spojeny pomocí svorníků (zpravidla jsou 4). Tato konstrukce však vyžaduje rozšíření dna válce a vodítka o plochu, pro upevnění svorníků. Z toho plynou větší prostorové nároky. Odpadá však problémy spojené se svařováním. Přibývá kontrola geometrie svorníků hlavně vzhledem k podélné ose. Nevýhodou pak je malá odolnost vůči silám v bočním a podélném směru [6].



Obr. 24 Válec svorníkový [6]

III. Ohýbané

Toto konstrukční řešení je čistě mechanické. Plášť válce je na svých koncích zahnut, tím dojde k sevření vodítka na jedné straně, zatímco na druhé je stejným způsobem připojeno dno válce. Celé spojení je patřičně utěsněno. Opět odpadají problémy se svařováním, dalším plusem jsou pak nízké výrobní náklady, které z části kompenzují nižší spolehlivost [6]. Využití nacházejí tyto válce v automobilovém průmyslu.



Obr. 25 Válec ohýbaný [6]

4.1.3 TĚSNĚNÍ

Lze je rozdělit na skupinu statických a dynamických těsnění [6]. Druhá skupina se dále dělí na těsnění rotační a translační. Právě dynamická těsnění ovlivňují velikost tření ve válci, s čímž přímo souvisí úroveň výsledné kvality odpružení.

Velmi důležité je patřičné utěsnění prostoru mezi vodítkem a pístnicí. Je vystaveno velkému tlakovému rozdílu. Slouží jako ochrana proti vniknutí nečistot z okolí do válce. V opačném případě by mohlo dojít k nevratnému poškození pístnice a dalších součástí válce. Druhou důležitou funkcí tohoto dynamického těsnění je zabránit úniku kapaliny z válce. Ne však zcela, je nutné pamatovat na to, že mezi vodítkem a pístnicí musí být ponechána malá vrstva kapaliny (řádově $1\mu\text{m}$), která zabezpečuje plynulý chod pístnice a snižuje tak tření.

V případě těsnění štěrbin mezi pístem a vnitřní stranou pláště je nutné eliminovat průtok kapaliny z komory pístnice do komory pístu, a naopak, během pohybu pístu.

Dlužno podotknout, že dynamická těsnění musí poskytovat dobré utěsnění i ve statickém stavu. Zde není k dispozici mazací film, statické tření je tak zpravidla vyšší než kluzné tření.

4.2 ZÁSObNÍKY (AKUMULÁTORY)

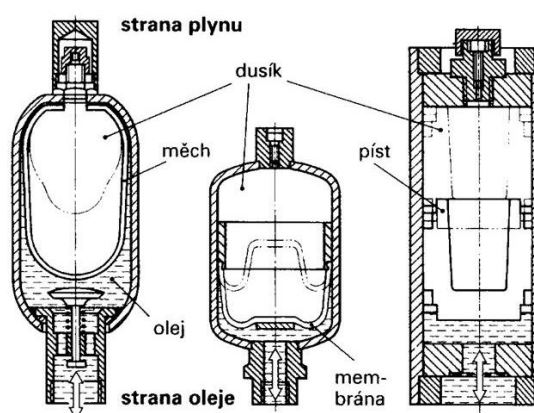
Jedná se o prvky v systému hydropneumatického odpružení, které tvoří pružné prostředí pro pérování. Obecně existuje mnoho druhů zásobníků, v hydropneumatice jsou však téměř vždy aplikovány hydropneumatické akumulátory naplněné plynem [6]. To z toho důvodu, že právě plyn je schopný generovat vratné síly, neboť je stlačitelný a zvyšuje svůj tlak, čím více je stlačován. Obvykle se jako médium používá dusík, v některých případech pak tetrafluormethan.

Vzhledem k tomu, že se jedná o tlakové nádoby, podléhají zásobníky přísným bezpečnostním předpisům. Stejně tak se musí dbát na co nejvyšší opatrnost např. při jejich údržbě. Před jakýmkoliv servisním úkonem hydropneumatické jednotky z nich musí být vypuštěn tlak tlakovým ventilem. Pokud by se tak nestalo, mohlo by dojít k poranění, mj. silným proudem kapaliny o vysoké teplotě.

Je důležité uvědomit si, že každý typ akumulátoru má předem danou hodnotu dovoleného provozního tlaku. Pokud není tento fakt respektován, může dojít až k předčasnému zničení.

4.2.1 TYPY ZÁSOBNÍKŮ

Hydropneumatické akumulátory se dělí na 3 základní typy. Obecně se však každý zásobník skládá z konektoru na straně kapaliny, vnějšího pláště, prvku, který odděluje plyn od kapaliny, plynu a přípojky na straně plynu, opatřené krytem [6]. Vlastnosti, které zásobníky charakterizují, jsou především referenční tlak, vnitřní objem, tlakový poměr a maximální průtok. Ten je velmi důležitý, neboť pohyb odpružení je často vyvolán rychlými otřesy, které způsobují vysoký průtok. Níže jsou popsány jednotlivé druhy.



Obr. 26 Typy akumulátorů (zleva: vakový, membránový, pístový) [24]

MEMBRÁNOVÉ ZÁSOBNÍKY

Oddělení plynu a kapaliny je v tomto případě pomocí membrány. Existuje dvojí provedení: svařované a šroubované. Právě šroubované poskytují více možností pro návrh vnitřního pláště [6]. Vhodně zvolený tvar má za následek lepší tlakový poměr (poměr plnicího a nejvyššího dovoleného pracovního tlaku). Další výhodou je možnost vyměnit opotřebovanou membránu. Svařované pak zase vynikají nižší cenou. Membránové zásobníky jsou obecně nejběžněji užívaným typem, s tímto faktem souvisí dostupnost různých velikostí.

PÍSTOVÉ ZÁSOBNÍKY

Kapalina a plyn jsou odděleny pomocí pístu. Taková konstrukce sebou však přináší vznik tření, které je způsobeno těsněním mezi pláštěm a pístem. Pro správnou funkci musí být drsnost pláště akumulátoru dostatečně malá. Také musí být zvoleno vhodné těsnění [25]. Tyto zásobníky mohou být použity pro velký rozsah teplot a také u aplikací, kde figurují široké změny tlaku. Další výhodou je možnost velkého průtoku a vysoký tlakový poměr.

VAKOVÉ ZÁSOBNÍKY

Jak název napovídá, pracovní média jsou od sebe oddělena pomocí vaku s plynem. Nevýhoda spočívá ve vysokých nákladech na výrobu takových velikostí zásobníků, které jsou žádoucí pro běžné aplikace [6]. Dále je to také malý tlakový poměr. Naopak ke kladným stránkám patří robustnost konstrukce, což má příznivý vliv na životnost [25]. Díky tomu, že lze akumulátor rozebrat, je možné vyměnit poškozený pryžový vak.

4.2.2 TLAKOVÁ ZTRÁTA

V souvislosti se zásobníky je nutno zmínit problém pro ně charakteristický. Je jím pomalá tlaková ztráta plynu, a to v důsledku difúze plynu do hydraulické kapaliny [6]. Její rychlost závisí na typu materiálu membrány, druhu plynu, velikosti membrány a na pracovních podmínkách (teplota a tlak uvnitř zásobníku). Tlak tak musí být doplňován, aby se nesnížila celková životnost.

Jednou s možností, jak dosáhnout předepsané úrovně tlaku, je doplňovat plyn po předem určených servisních intervalech. Nabízí se také elegantní řešení, které spočívá v připojení akumulátoru k přídavné tlakové nádobě s plynem.

Obě výše zmíněné koncepce lze nazvat jako externí řešení. Nutno zmínit, že únik plynu do kapaliny lze eliminovat také úpravou konstrukce zásobníku.

První způsob spočívá ve změně druhu plynu. Je žádoucí volit takový plyn, jehož molekuly zpomalují difuzi. Z tohoto důvodu se upřednostňuje tetrafluormethan před dusíkem. Druhý způsob spočívá ve změně materiálu membrány. Vhodnou volbou mohou být speciální typy elastomerů či vícevrstvé membrány, opatřené mezivrstvou s materiálem, který potlačí difuzi.

V praxi se však lze setkat s případy, kdy je tlaková ztráta tak malá, že se blíží běžné životnosti celého zásobníku. V takovém případě se pak většinou plyn nedoplňuje a vymění se rovnou celý akumulátor. Odpadá tak konektor pro doplňování plynu, což částečně snižuje náklady a prostorové nároky.

4.2.3 ZÁSTAVBA

Zpravidla jsou zásobníky připevněny k odpovídající části podvozku vozidla, a to pomocí speciálních objímek, nebo je využíván jejich konektor na straně kapaliny [6]. Pomocí něj jsou pak přišroubovány k dodatečnému držáku, řídicímu bloku či přímo k válci.

4.3 PRŮTOKOVÉ ODPORY

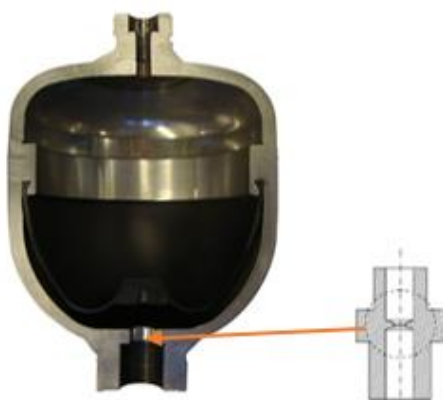
Tyto přídavné prvky lze rozdělit do tří následujících skupin: nenastavitelné, závislé na směru toku a nastavitelné průtokové odpory.

4.3.1 NENASTAVITELNÉ PRŮTOKOVÉ ODPORY

Do této skupiny spadají průtokové odpory typu trysky a škrťací klapky. Jejich funkce a vlastnosti byly podrobně rozebrány v podkapitole 3.2.2. Důvodem, proč jsou zmíněny opět, jsou možnosti jejich instalace v systému odpružení.

Pokud je předem definována žádoucí velikost tlumení, kterou má odpor způsobit, je nejjednodušším řešením zakomponovat ho do již existujících prvků odpružení [6]. Mohou jimi být například válce, zásobníky, armatury. Naopak se nedoporučuje umístění v hadicích či potrubích, a to z důvodu potřeby použití jejich dražších variant.

Druhou možností je instalovat odpor tak, aby se dal případně vyměnit. To je žádoucí tehdy, když je systém ve zkušebním režimu. Zkoušením různých typů odporů lze docílit optimálního nastavení. Případy, kdy je žádoucí možnost změny odporu, jsou aplikace, kde se stejný systém odpružení používá pro různé způsoby zatěžování. Odpory jsou pak ke vhodným součástem odpružení, jako jsou armatury, konektory, svorníky, buď přišroubovány, vloženy nebo zajištěny pojistným kroužkem. Toto řešení jen přidává na celkové univerzálnosti hydropneumatického systému.



Obr. 27 Způsob umístění průtokového odporu [26]

4.3.2 ODPORY ZÁVISLÉ NA SMĚRU TOKU

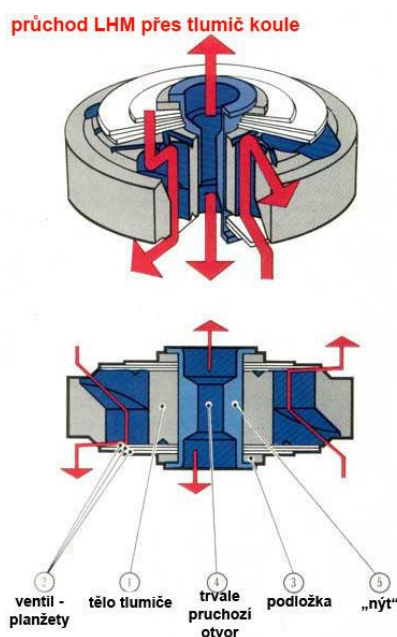
Tento typ se používá v případě, kdy je žádoucí docílit jiného, obvykle vyššího, tlumení při odskoku než při stlačení.

Optimální řešení spočívá v paralelním zapojení dvou odporů v místě vedení kapaliny, tj. mezi válcem a akumulátorem [6]. Musí se však uvažovat, že jedna větev s odporem je navíc opatřena zpětným ventilem. V praxi pak dojde k tomu, že při odskoku je ventil uzavřen, tím pádem kapalina proudí pouze přes jeden průtokový odpor, což způsobí větší tlakovou ztrátu a tím i vyšší tlumení. Naopak při stlačení dojde k otevření zpětného ventilu, a tak kapalina prochází přes obě větve (viz. obr.:). Dojde tak k nižší tlakové ztrátě, což má za následek nižší tlumení.

Dalším způsobem, jak rozdílné tlumení vyřešit, je pomocí hydraulického tlumícího obvodu. Ten je možné připodobnit k tlumícím pístům umístěným ve standartních tlumících jednotkách u odpružení vozidel. Umožňují rovněž změny chování tlakové ztráty oproti průtoku. Existuje

několik návrhů tlumicích pístů, společným prvkem je však oddělení průtokových cest pro stlačení a odskok, v kombinaci s tlakovým pojistným ventilem.

Princip funkce je následující. Při stlačení prochází kapalina otvory na větším poloměru [20]. Tyto otvory jsou přikryty pružnou tenkou ocelovou podložkou umístěnou na horní ploše tlumicího pístu, na kterou působí relativně malá přitlačná síla. Naopak při odskoku kapalina proudí otvory na poloměru menším. Rovněž zde jsou otvory přikryty ocelovou podložkou, na kterou však působí mnohem větší síla předpětí. Je tedy patrné, že při stlačení je propuštěno větší množství kapaliny než při odskoku (viz. obr. 28).



Obr. 28 „Tlumicí píst“ [27]

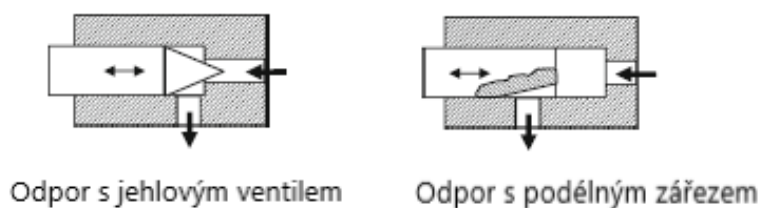
Systém tlumicího pístu lze umístit do cesty kapaliny mezi válcem a akumulátorem [6]. Vznikne tak nová komponenta. Případně je možné jej integrovat přímo do zásobníku či válce.

4.3.3 NASTAVITELNÉ PRŮTOKOVÉ ODPORY

Na úvod je potřeba zmínit fakt, že charakter tlumení lze měnit (nastavovat) buď manuálně, nebo automaticky. V případě první možnosti nastavuje obsluha stroje mechanicky požadované tlumení (změnou vlastností odporu) [6]. Naopak automatické nastavení se dělí na pomalé (adaptivní) a rychlé (poloaktivní).

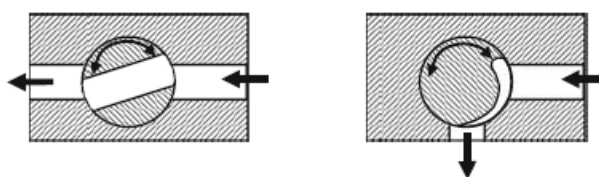
Nastavitelné odpory by měly být konstruovány tak, aby vykazovaly nízkou tlakovou ztrátu v otevřeném stavu, která zajistí široký provozní rozsah. Jsou rozděleny na rotační a translační.

Odpory s omezením ve směru translace mohou být opatřeny jehlovým ventilem (pro pomalé tlumení) či podélným zářezem.



Obr. 29 Typy translačních odporů [6]

Naopak odpory s rotačním omezením, obsahují např. kulový ventil (vlevo), nebo škrtkící klapku ve tvaru válce (vpravo).



Obr. 30 Typy rotačních odporů [6]

Manuálně se tlumení zpravidla nastavuje přímo pomocí regulačního šroubu v tlumícím prvku, případně vzdáleně bowdenem. U elektronicky řízených systémů lze nastavení realizovat pomocí elektromotoru (pro pomalé nastavení) nebo solenoidu (v případě rychlého nastavení).

Je třeba mít na paměti, aby při poruše nastavitelného tlumení systému, přešel celý systém do nouzového režimu. Pokud se tak stane, je nutné vysoké tlumení z důvodu, aby pokrylo všechny provozní podmínky. V případě odpružení vozidel se porucha projeví zpravidla pomocí kontrolky, která signalizuje nutnost kontroly.

4.4 VEDENÍ

Neboť je třeba kapalinu v systému odpružení rozvádět, je nutné zaměřit se na tento poznatek detailně.

4.4.1 VEDENÍ

Rozlišují se 3 základní funkční oblasti. Jejich stručná charakteristika je popsána níže.

OKRUH ODPRUŽENÍ

Jedná se o rozvod kapalinu mezi válci, zásobníky a tlumícími elementy. Vyskytují se zde vysoké průtoky média (měnící směr) z důvodu střídavého pohybu pérování [6]. Tok neustále se pohybující kapaliny je omezován vedením, což má přímý vliv na chování odpružení. Při konstrukci vedení musí být bráno v potaz, že válce musí zůstat pohyblivé vzhledem k ostatním komponentám. Zpravidla je tak do nich kapalina přiváděna pomocí hadic. Další důležitou věcí

je volba bezpečnosti, vždy by měly být voleny její vyšší hodnoty, neboť sebemenší trhлина v hadici může vést k celkové poruše systému.

ŘÍDÍCI OKRUH

Okruh slouží pro propojení okruhu odpružení s doplňkovými komponentami (např. jednotka sloužící k regulaci úrovně pérování, systém pro řízení tlaku předpětí), pokud v něm nemohou být instalovány přímo [6]. Zpravidla může být připojení realizováno v jakémkoliv místě.

NAPÁJECÍ OKRUH

Jak název napovídá, jedná se o vedení spojující řídicí okruh se systémem zabezpečujícím dodávku kapaliny. Vedení kapalinu buď dodávají nebo odčerpávají, v závislosti na požadavcích doplňkových komponent [6]. Jedná se obvykle o dlouhá vedení, neboť hydraulické čerpadlo a nádržka s kapalinou, jsou obvykle vzdáleny od systému odpružení.

4.4.2 REALIZACE VEDENÍ

Kapalinu lze vést prostřednictvím trubic a hadic.

TRUBICE

U systému s předdefinovanou geometrií je jejich použití upřednostňováno před hadicemi [6]. Zpravidla jsou vyráběny z oceli, takže je zaručena pevnost i v případě malých rozměrů, nízké poloměry ohybu zajistí efektivní využití prostoru. Dále lze přesně určit, kudy budou vedeny, přičemž držáky brání nežádoucímu pohybu. Kov zaručí vysokou spolehlivost trubic, spojenou s eliminací úniku kapaliny. Ty mají také velkou odolnost vůči únavě. Z ekonomického hlediska jsou trubice výhodnější, oproti hadicím. Nevýhodou je pak malá flexibilita, při zásahu do konstrukčního prostoru jsou nutné větší zásahy do konstrukce vedení. Nastávají také problémy s manipulací, přepravou, skladováním...

HADICE

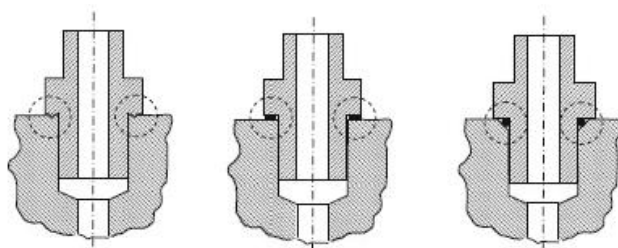
Ačkoliv mají trubice řadu výhod, nesmí být opomenuto ani použití hadic. Skládají se obvykle z minimálně tří vrstev [6]. Kapalině je nejbližší vnitřní vrstva, musí tak mít vůči ní patřičnou odolnost. Obvykle je vyrobena z elastomeru. Dále je nutná odolnost vůči tlaku uvnitř hadice, tu zajistí tzv. výztužná vrstva. Je tvořena textilním či kovovým opletením, v závislosti na velikosti tlaku mohou být opletení vrstveny. Vnější vrstva, obvykle ze směsi kaučuku, chrání předešlé obložení před mechanickým namáháním či agresivními látkami. Výhodou je možnost spojení komponent, které se vůči sobě pohybují, či například menší přenos extrémních hodnot tlaků a mechanických vibrací. Nevýhodou je malé využití konstrukčního prostoru (kvůli velkým poloměrům ohybu a tloušťce stěny). Vysoká pružnost hadic zvyšuje počet nutných

kotvicích bodů, aby bylo přesně vymezeno vedení. Negativním aspektem je pak náchylnost na únik kapaliny, který může být iniciován sebemenší trhlinou.

ARMATURY

Pomocí spojek je realizováno spojení trubic, hadic s komponentami odpružení. Velmi často používané je spojení typu vnější závit-vnitřní závit [6]. Je nutné pamatovat na patřičné utěsnění spoje. Může jím být těsnění s hranou (zářezem), s kovovým těsnícím prvkem nebo s elastomerem.

Způsob upevnění spojky k trubici je zpravidla připájením nebo svařením. Naopak v případě hadic se uplatňuje nalisování spojky. V současnosti se však i pro spojení hadice či trubice používají elastomery, v kombinaci s řeznými kroužky. Dalším způsobem je použití těsnícího kužele s o-kroužkem. Na spojku jsou pak namontovány pomocí procesu přírubování. Dále jsou v závislosti na typu systému opatřeny maticí či objímkou.



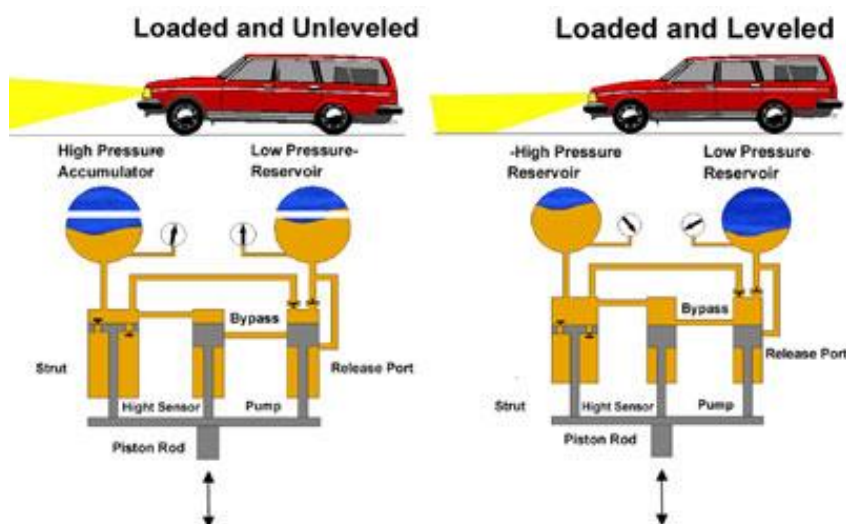
Obr. 31 Příklady utěsnění (zleva: s hranou, s kovovým těsněním, s elastomerem) [6]

5 SYSTÉMY PRO REGULACI ÚROVNĚ ODPRUŽENÍ

Rozlišují se obecně 3 základní typy těchto systémů.

5.1 SAMOČERPACÍ SYSTÉMY

Systém je založen na principu, že válec využívá k nastavení optimální úrovně energii získanou z pohybu mezi neodpruženou a odpruženou hmotou [20]. Pohyb vzniká právě přejezdy přes nerovnosti. Lze konstatovat, že právě tato zvláštnost je charakteristickým rysem těchto systémů. Aby systém fungoval, je nutné vybavit válec nosným systémem, systémem pro regulaci úrovně odpružení a systémem pro čerpání a uvolňování kapaliny [6]. Při zatížení dochází ke snížení světlé výšky, válce jsou tedy stlačeny. Dojde k přesunu pístu (náležícímu systému řízení úrovně) do polohy, která brání proudění kapaliny z nosného systému do nádoby. Následuje aktivace čerpadla, které čerpá kapalinu zpětným ventilem do nosného systému. Odpružení se tak neustále vrací do své konstrukční polohy. Naopak dojde-li ke snížení zátěže, kapalina se přesune do nádoby (spoluprací systému uvolnění kapaliny a systému řízení úrovně), čímž se odpružení vrátí do původní polohy. Výhodou těchto systémů jsou nízké prostorové nároky, spolehlivost a relativně malé náklady. Uplatnění nacházejí především v osobních automobilech. Na obrázku níže se nachází schéma popisující funkční princip u systému Nivomat vyvinutého firmou ZF Sachs.

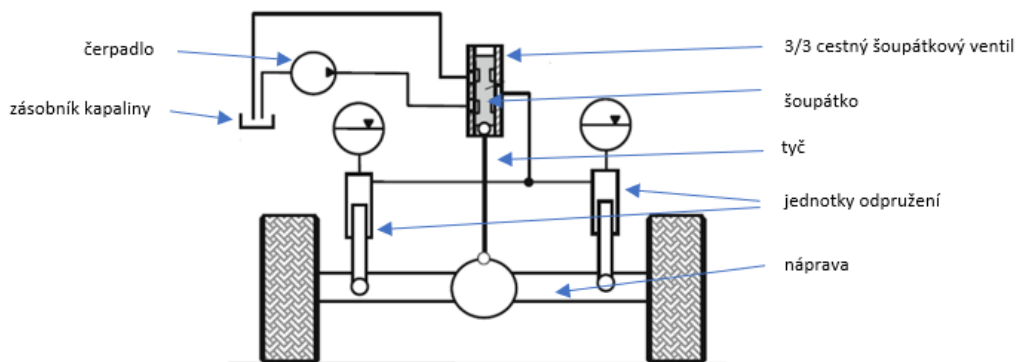


Obr. 32 Princip funkce systému Nivomat (před a po vyrovnaní) [28]

5.2 MECHANICKÉ ŘÍZENÍ ÚROVNĚ S EXTERNÍM ZDROJEM HYDRAULIKY

Základní komponenty okruhu odpružení jsou doplněny o vyrovnávací ventil a čerpadlo [6]. Ventil reaguje na odchylku odpružení od konstrukční polohy dodáváním/ uvolňováním hydraulické kapaliny do/ z okruhu odpružení, aby jí bylo dosaženo. Pro tento účel může být zvolen např. 3/3 cestný šoupátkový ventil ovládaný tyčí. Tyč je v případě odpružení nápravy k nápravě připojena, pohybuje se tak s každým kmitem mezi neodpruženou a odpruženou hmotou. Pokud dojde k pohybu nápravy směrem k podvozku, tyč se stlačí a s ní i šoupátko,

směrem nahoru. Je tak umožněn průchod kapaliny z čerpadla do jednotek odpružení. Tím se zvýší poloha. Naopak, odkloní-li se náprava směrem od podvozku, šoupátko se pohybuje směrem dolů. Dojde k propojení jednotek odpružení s nádrží kapaliny a tím se poloha sníží. Nepohne-li se šoupátko ani v jednom směru, úroveň odpružení je konstantní.

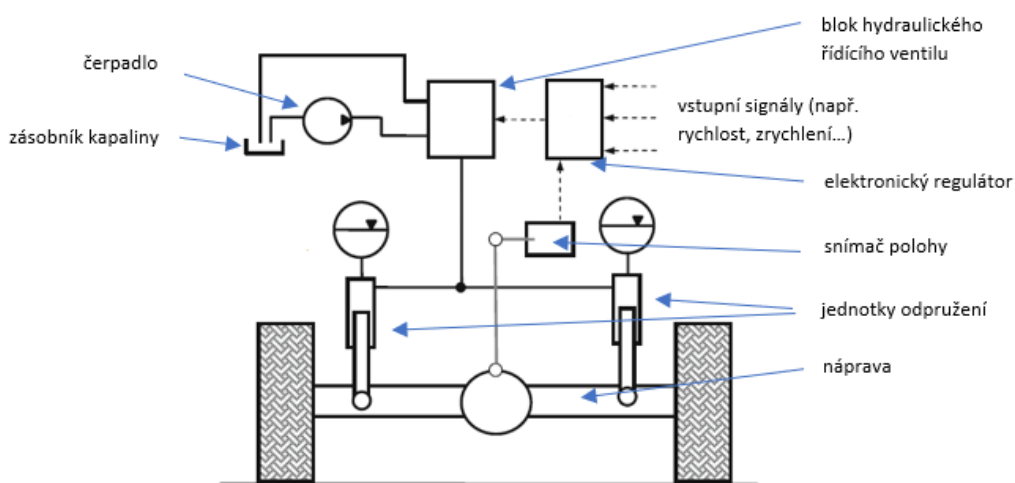


Obr. 33 Schéma mechanického řízení úrovně [6]

Výhodou systému je jednoduché provedení, nevýhodou je např. fakt, že systém lze upravovat pouze mechanicky. Nicméně použití nachází tyto systémy zejména u osobních aut.

5.3 ELEKTRONICKÉ ŘÍZENÍ ÚROVNĚ S EXTERNÍM ZDROJEM HYDRAULIKY

Princip funkce je následující: snímání a přenos informací o poloze odpružené hmoty vůči neodpružené hmotě je prováděn nejen mechanickou formou, nýbrž navíc dochází k transformaci dat na elektrický signál pomocí snímače polohy [6]. Signál je předáván elektronickému regulátoru, ten na základě svých řídicích algoritmů vyhodnotí, zda je nutná úprava polohy. Pokud ano, tak jakým směrem (pokles x zdvih), popřípadě i jakou rychlostí, má být změna provedena.



Obr. 34 Schéma elektronického řízení úrovně [6]

Hydraulický okruh systému může být realizován opět pomocí 3/3 (popř. 3/2) cestného šoupátkového ventilu (s elektrickým ovládáním). Nutno zmínit, že možností provedení okruhu je hned několik.

Takovéto systémy nabízí řadu výhod. Tou hlavní je fakt, že lze použít další signály, např. rychlost, zrychlení, teplotu hydraulické kapaliny, které lze zahrnout do řídicího algoritmu. Ten lze také měnit pomocí jiného softwaru. Z toho plyne, že lze použít stejné komponenty pro různé aplikace, přičemž změna bude spočívat pouze v přeprogramování regulátoru. Systémy se používají především u pracovních strojů (zejména zemědělské a stavební stroje).

6 SPECIÁLNÍ FUNKCE

Jak již bylo zmíněno v úvodu, hydropneumatické odpružení nabízí řadu speciálních funkcí. Už jen díky jejich zajímavosti nelze tuto kapitolu opomenout.

6.1 ZABLOKOVÁNÍ ODPRUŽENÍ

Jedná se o speciální funkci, jež je v případě některých vozidel vyžadována. Typickým příkladem jsou pracovní stroje, kde by odpružení reagovalo na měnící se zátěž v důsledku zvedání či pokládání nákladu, změnou polohy [6]. To by značně komplikovalo přesnost, s jakou je náklad umístěn (např. do regálů). Je však jasné, že odstavení odpružení omezí komfort a neodpružené rázy mohou mít negativní vliv na životnost komponent.

Aktivace funkce může proběhnout dvěma způsoby. Manuálně obsluhou stroje, nebo pokud lze přesně definovat podmínky pro aktivaci, je možné automatické zapnutí (jsou použity např. senzory). Ke zvýšení bezpečnosti pak přispěje možnost deaktivace systému po tom, co vozidlo dosáhne určitou rychlost.

V praxi se používají 3 způsoby blokace odpružení. První možnost je blokací hydraulického okruhu. Obecné provedení spočívá v zastavení průtoku kapaliny mezi pístovou komorou válce a příslušným zásobníkem. Druhým způsobem, jak zablokovat odpružení, je stlačit píst k dorazu a v této poloze ho zajistit pomocí síly předpětí vyvolané tlakem kapaliny na opačné straně pístu. Tato funkce bývá aplikována u odpružení přední nápravy traktorů (např. systém Carraro). Posledním řešením je zablokování díky vysoké tuhosti. Tato možnost se týká systémů s variabilním předpětím a spočívá ve zvýšení síly předpětí na maximum, čímž dojde ke zvýšení tuhosti. Je-li její hodnota dostatečně vysoká, sotva pak lze rozlišit rozdíl od mechanického způsobu zablokování. Tento způsob blokace využívá např. společnost John Deere (odpružení přední nápravy TLS Plus).

6.2 NASTAVENÍ NULOVÉ POLOHY

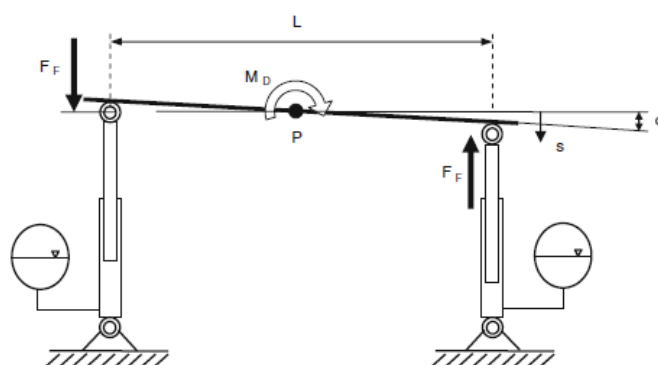
Tato charakteristická funkce hydropneumatického odpružení umožňuje systému měnit světlou výšku vozidla. Podvozek tak lze snížit, což znamená nižší aerodynamický odpor. Naopak, při zvýšení podvozku se zlepšuje průchodnost terénem. U některých vozidel je zase možná výměna pneumatik bez zvedáku atd.

Nulová poloha může být měněna změnou množství hydraulické kapaliny v hydraulickém okruhu v oblasti činnosti pístu [6]. Nabízí se dvě možnosti, jak ji nastavit. Tou první je, že obsluha stroje stiskem a držením tlačítka aktivuje hydraulické ventily, druhou je pak přednastavení požadované výšky, které pak systém automaticky dosáhne. V obou případech však dojde ke změně charakteristik (komprese a odskoku). Tím může být omezen komfort, či v důsledku rázů může docházet ke zvýšenému opotřebení komponent. Proto se doporučuje omezit možnosti nastavení, např. tím, že změna světlé výšky je možná pouze do určité rychlosti vozidla.

6.3 ZMĚNA KLONĚNÍ A KLOPENÍ

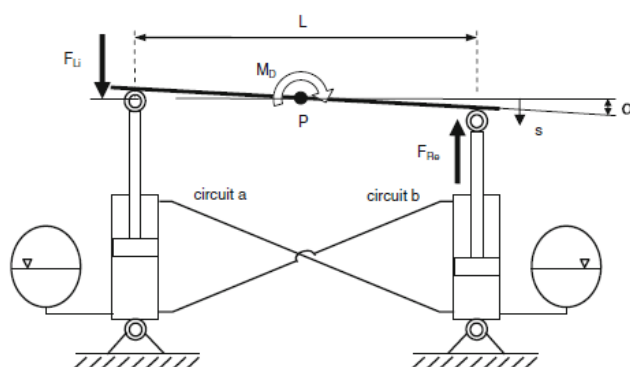
U některých aplikací odpružení vozidel, je nutné zvážit, zda u nich nedochází ke zvýšenému klonění či klopení. Oba zmíněné pohyby mohou mít negativní vliv na chování a ovladatelnost vozidla. Při brzdění či akceleraci může být vyvoláno nadměrné klonění, naopak při zatáčení se může vozidlo nepřiměřeně naklápět. Klopení lze eliminovat mechanicky použitím torzní tyče [6]. Snížení klonění lze dosáhnout změnou dispozice předních a zadních prvků odpružení. V případě osobních aut však bývá delší rozvor než rozchod, což samo o sobě vede ke snížení klopení. Důležitější je tedy uvést možnosti, jak lze změnit klopení pomocí prostorového uspořádání komponent odpružení (obecně je však lze aplikovat i na snížení klonění).

Prvním způsobem je umístit prvky odpružení naproti sobě a přiřadit každé vlastní zásobník. Oba prvky odpružení tak působí proti rotaci (vyvolané klopením).



Obr. 36 Stabilizace klopení [6]

Druhou možností jsou spárované dvojčinné válce umístěné na obou stranách. Tedy pístová komora jednoho válce je spojena s komorou pístnice na druhé straně a naopak. Vzniknou tak dva oddělené hydraulické okruhy odpružení, ty musí být vybaveny alespoň jedním zásobníkem, který zajistí funkci odpružení. V statickém stavu je tlak u obou obvodů regulován na stejnou hodnotu. Vyrovnávání se provádí buď přidáváním nebo odebráním kapaliny z obou obvodů naráz.



Obr. 35 Stabilizace klopení propojením komor válců [6]

6.4 ÚPRAVA TUHOSTI PRUŽINY SELEKTIVNÍM PŘIPOJENÍM ZÁSObNÍKŮ

Na úvod je nutné podotknout, že tato úprava se provádí u systémů nepředepjatých a mechanicky předepjatých [6]. Neboť v případě systémů s hydraulickým předpětím je možné měnit tlak předpětí v oblasti pístnice a tím měnit tuhost. Úprava má smysl v případě vozidel, u kterých je odpružení vystaveno vysoce odlišným provozním podmínkám.

V praxi je tuhost upravována připojením dvou a více zásobníků k systému odpružení a jejich následným zapínáním/vypínáním v závislosti na tom, jaký objem plynu je potřeba. Akumulátory pak mohou mít stejný nebo odlišný referenční tlak. Důležité je, že čím více je zásobníků s plynem, tím narůstá celková hmotnost plynu. Tím dojde ke změně tuhosti. U nepředepjatých systémů lze uvést příklad: sníží-li se hmotnost plynu na polovinu, tuhost se zdvojnásobí.

7 VYUŽITÍ U VOZIDEL

V průběhu této práce jsou již v některých pasážích (sekce 3.1.1) zmíněny způsoby využití různých druhů hydropneumatických systémů (jejich konstrukčních řešení) u vozidel. Tato kapitola se tedy zaměřuje pouze na příklady dalších systémů, které byly v průběhu práce zmíněny buď jen okrajově, nebo vůbec.

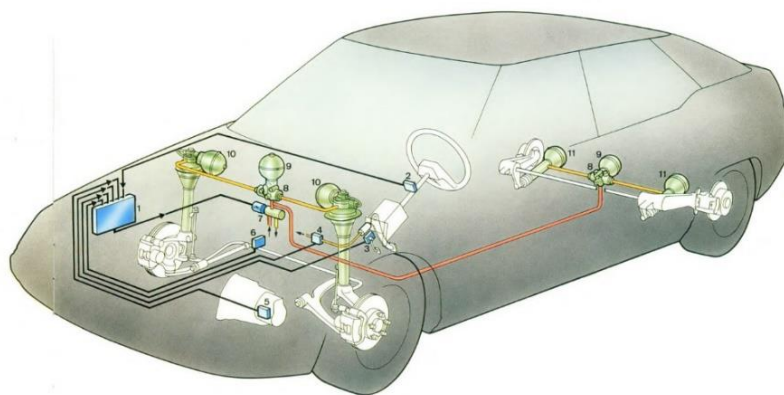
7.1 SYSTÉMY VYVINUTÉ SPOLEČNOSTÍ CITROËN

Hydropneumatické odpružení u vozidel Citroën lze rozdělit na systém Hydractive a Activa.

7.1.1 ODPRUŽENÍ PODVOZKU HYDRACTIVE

Jedná se o první systém pérování řízený elektronikou. Postupem času byl neustále vylepšován a vzniklo tak několik jeho modifikací, které jsou v průběhu textu zmíněny.

Nejdříve je nutné popsat původní systém. Nese název **Hydractive I** a poprvé byl použit u modelu XM, který začal sjíždět z výrobních linek v roce 1989 [29]. Kromě tradičních funkcí, jako je možnost změny světlé výšky, nabízí dva provozní režimy odpružení (sport vs. komfort). Tuto variabilitu lze připodobnit ke klasickým adaptivním tlumičům té doby.



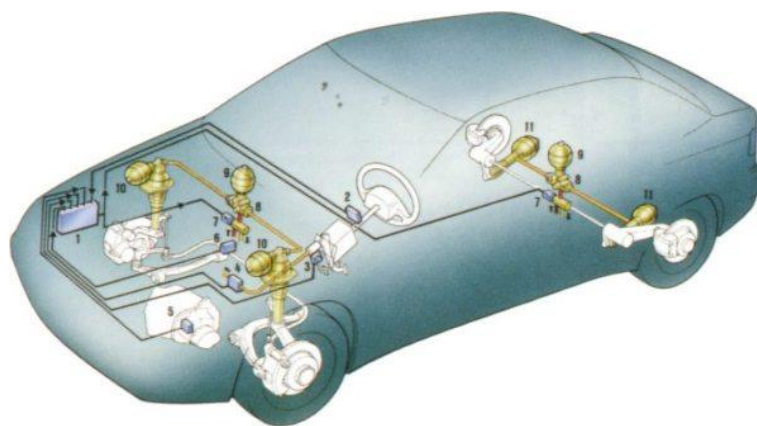
Obr. 37 Hydractive I [30]

Změnu umožňuje centrální ventil [6]. Pokud je v provozu (tedy napájen), obě jednotky odpružení jsou propojeny přes řídicí ventil a je tak umožněn průtok hydraulické kapaliny do třetího zásobníku. Hmotnost plynu v něm je důvodem pro relativně nízkou tuhost v tomto provozním režimu. Propojení jednotek odpružení však vytváří takovou konfiguraci, která nezajistí snížení klopení. To je tedy eliminováno pouze mechanicky, a to pomocí torzní tyče. Systém v tomto režimu poskytuje měkkší odpružení a tím i vyšší komfort.

Naopak není-li centrální ventil napájen, jednotky odpružení jsou odděleny řídicím ventilem. Takové prostorové uspořádání zajišťuje snížení klopení. V této konfiguraci je třetí zásobník od jednotek odpružení odpojen, což má za následek zvýšení tuhosti každé z nich. Je jasné, že v tomto režimu poskytuje systém vyšší stabilitu klopení a umožňuje tak sportovnější jízdu.

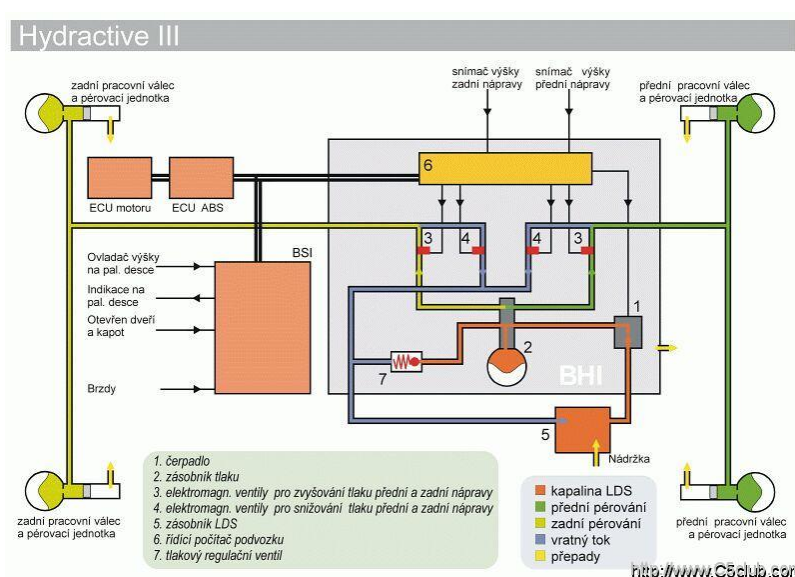
Mezi oběma režimy může systém volit samočinně, pomocí čidel, které monitorují například úhel, s jakým je volant natočen [29]. Další senzory pak hlídají polohu plynového pedálu či tlak v brzdovém systému. Nelze také opomenout gyroskop pro sledování klopení karoserie či snímač tempa jízdy. Při konstrukci bylo pamatováno i na možnost přepnout režimy mechanicky, prostřednictvím tlačítek umístěných v kabině vozu.

Ve snaze o zdokonalení původního systému přišel Citroen s další generací odpružení. Jmenuje se **Hydractive II** a byl jím vybaven jak stávající model XM, tak i v té době nová Xantia. Vylepšení spočívá ve schopnosti měnit tuhost plynuleji a pohotověji. Došlo rovněž ke změkčení sportovního režimu, neboť se původní nastavení ukázalo jako příliš tvrdé.



Obr. 39 Hydractive II [31]

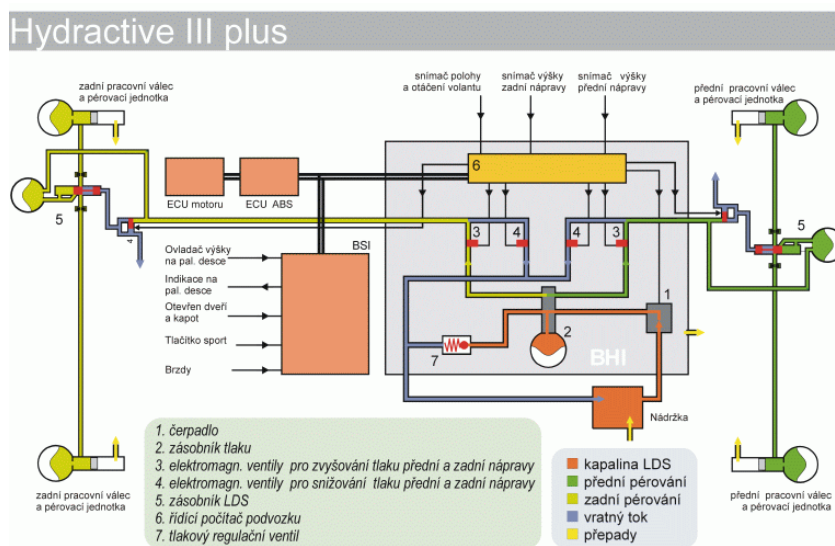
Následná generace systému přišla na trh společně s modelem C5. Nazývá se **Hydractive III** a počtem zásobníků (celkem 5) se navrátila zpět k původnímu řešení systému odpružení. Tento počin lze nazvat jako konstrukční zjednodušení. Systém tedy nepracuje se třetím akumulátorem, jak v případě předchozích verzí Hydractive. Tím nedochází k tak velké změně tuhosti, která je nyní řízena pouze elektronicky, opět prostřednictvím několika snímačů [30].



Obr. 38 Hydractive III [32]

Předností systému je však schopnost měnit automaticky světlou výšku v závislosti na rychlosti automobilu a kvalitě vozovky. Je-li silnice v dobrém stavu a jede-li vozidlo více než 110 km/h, světlá výška se sníží vpředu o 15 mm a vzadu o 11 mm [29]. Dojde k poklesu odporu vzduchu,lepší se jízdní vlastnosti a klesne spotřeba. Naopak v případě, že je vozovka hrbolatá a rychlost je upravena pod 60 km/h, zvýší se podvozek o 20 mm [20]. Další změnou je to, že čerpadlo je poháněno samostatným elektromotorem, tím je umožněna manuální změna světlé výšky i při vypnutém motoru.

Modernizovaná třetí generace se jmenuje **Hydractive III+**. Lze konstatovat, že jde o obdobu systémů Hydractive I a II (každé nápravě náleží 3 zásobníky) [30]. Vlastnosti jimi poskytované jsou kombinovány s vyspělými vlastnostmi generace Hydractive III. Po vzoru starších verzí jsou tedy k dispozici opět dva režimy, nabízející tužší a měkčí charakter pérování. V souvislosti s tímto systémem lze ještě zmínit verzi Hydractive III+ s tlumiči AMVAR, které poskytují proměnnou tuhost. Dokážou tak velmi efektivně tlumit krátkodobé rázy. Toto řešení se však týká pouze modelu C6.

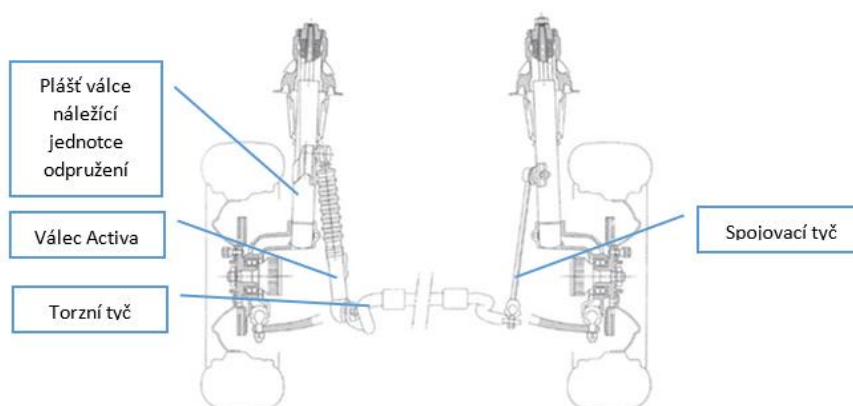


Obr. 40 Hydractive III+ [33]

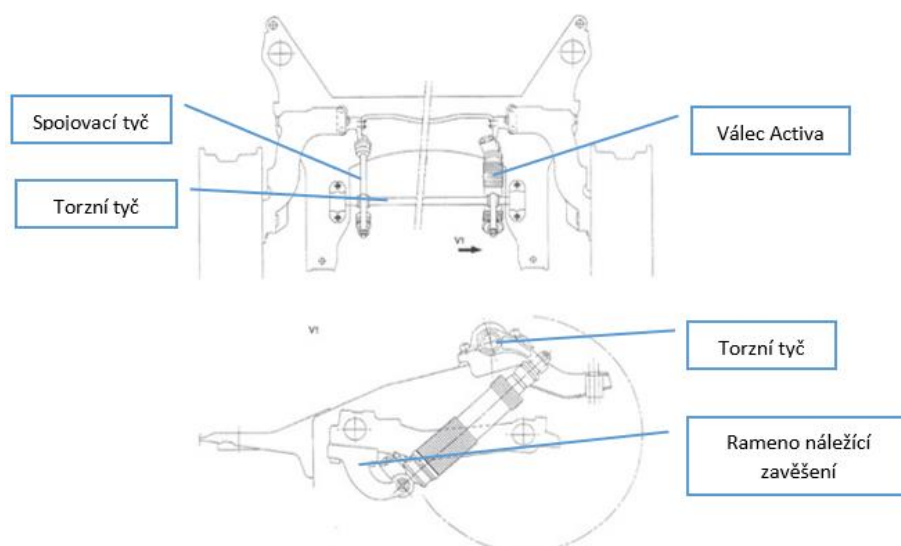
7.1.2 ODPRUŽENÍ PODVOZKU ACTIVA

V případě systémů odpružení podvozků vozidel značky Citroën je zapotřebí zmínit další konstrukční řešení, které lze datem vzniku umístit mezi pérování Hydractive II a III.

Ve snaze o minimalizaci klopení uvedla automobilka u modelu Xantia nové řešení problematiky [29]. Systém jménem Activa pracuje s osvědčenou torzní tyčí, kterou však využívá k aktivnímu řízení klopení [6]. Tato kontrola je dosažena pomocí hydraulického válce Activa, který spojuje vzpěru právě s torzní tyčí. Vzpěrou je myšlen plášť válce náležící základní jednotce odpružení v případě přední nápravy, načež u té zadní je válec Activa připojen k rameni náležícímu zavěšení. Nutno zmínit, že systém umožňuje celkem 3 stavy (funkce), a ve snaze o maximální využití stávajících komponent odpružení je potřebný hydraulický okruh založen na pérování Hydractive II [6][29].



Obr. 41 Odpružení přední nápravy Activa [34]



Obr. 42 Odpružení Activa zadní nápravy [35]

Z důvodu, že je zapotřebí řídit jeden dvojčinný válec pro každou nápravu, je třeba, aby mohlo být využito dostupných komponent, které jsou navrženy pro (jednočinný) systém regulace polohy [6]. Celé řešení spočívá v neustálém předpětí komory pístnice náleží válci Activa, které je vyvoláno plným tlakem čerpadla. Pro zajištění pružnosti okruhu náleží oblasti pístnice, je u obou náprav přítomen zásobník. Stlačení válce Activa probíhá připojením komory pístu k nádrži kapaliny. Vysoké předpětí pak kapalinu z pístní komory odvede. V dalším textu jsou popsány jednotlivé stavy systému Activa.

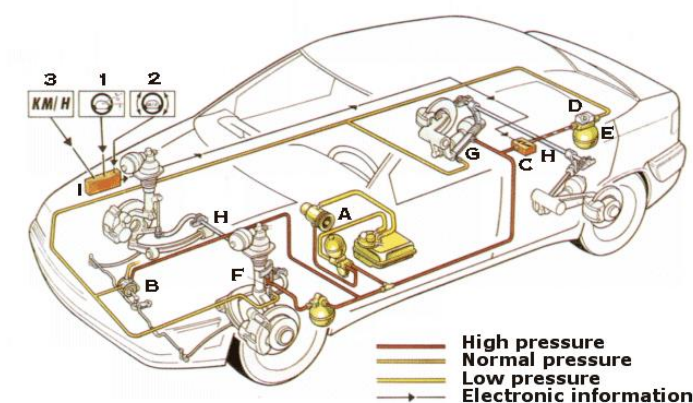
Jede-li vozidlo v přímém směru, jedná se o stav 1. Řídicí ventil je tak napájen, což má za následek spojení zásobníku s pístovými komorami válců, a to přes polohový ventil (3/2 cestný). Vznikne tak konfigurace, která způsobí jemnou stabilizaci klopení. V kombinaci s odpružením Hydractive, respektive s jeho komfortním režimem, je dosaženo maximální cestovní pohodlí.

Jakmile začne vozidlo zatáčet, dojde k přepnutí režimu Hydractive na tvrdé (sportovní) nastavení a rovněž se aktivuje stav 2 systému Activa. Z válce se tak stane pevná spojovací tyč.

Děje se tak odpojením řídicího ventilu (přestane být napájen), jehož odpojení přivede polohový ventil do polohy, která odděluje zásobník od pístové komory válce. Stav 2 tedy zajišťuje velmi nízké klopení.

Zvýší-li se v průběhu zatáčení zrychlení, zvětší se klopení. Pokud dojde k překročení určité hodnoty, aktivuje se stav 3 systému Activa. Rozdíl v posunutí pístu obou vzpěr náleží k přední nápravě vede k aktivaci regulačního ventilu úhlu natočení. Dojde tak k přivedení/uvolnění hydraulické kapaliny do/z komory pístu hydraulického válce náleží k přední a zadní nápravě. Touto cestou se podvozek vrátí do polohy, která má za úkol kopírovat povrch vozovky.

Nutno zmínit, že celý systém pracuje na základě signálů získaných pomocí snímačů, což je logické vzhledem k tomu, že je založen na systému Hydractive.



Obr. 43 Odpružení Activa [36]

1...úhel natočení volantu, 2...rychlost otáčení volantu, 3...rychlost vozidla, A...vysokotlaké čerpadlo, B...regulační ventil úhlu natočení, C...řídicí ventil, D...polohový ventil, E...zásobník, F...přední válec Activa, G...zadní válec Activa, H...torzní tyče, I...řídicí jednotka [36].

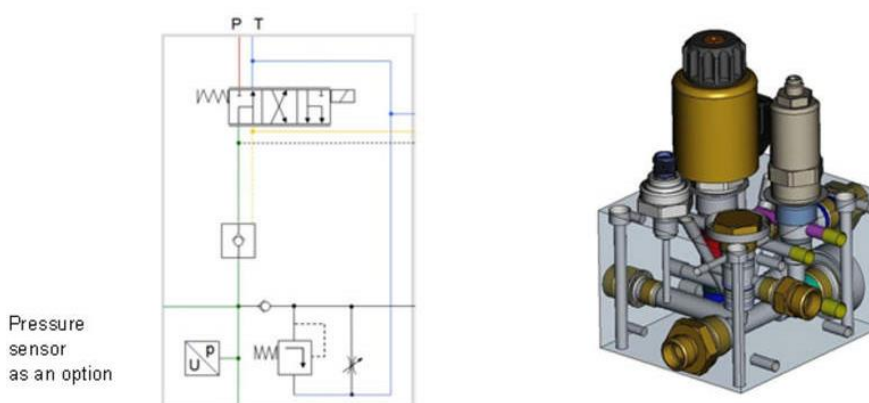
7.2 ARGO HYTOS

Společnost ARGO-HYTOS, pohybující se v oblasti mobilní a průmyslové hydrauliky, přišla na trh s tzv. modulárním regulačním systémem pro hydropneumatické odpružení [37]. Ten pracuje s typizovanými moduly, u nichž je možnost nastavit jejich parametry. Je tak umožněno vytvořit velké množství různých konstrukčních řešení. To má za následek snížení konstrukční náročnosti a dochází i k redukci vysokých nákladů vynaložených na samotné komponenty odpružení. Jedná se totiž o hlavní dva důvody, proč se hydropneumatické odpružení vyskytuje pouze v omezeném množství aplikací.



Obr. 44 Komponenty modulárního systému [38]

Základem systému je hydraulický řídicí blok. Ten v nejjednodušší konfiguraci obsahuje pouze základní modul, který je určen pro regulaci úrovně odpružení. Je konstruován tak, že obsahuje pouze jeden elektromagnetický ventil v proporcionálním provedení. Potřebuje také jen jeden elektromagnet. Celé toto řešení vede ke zjištění, že nastavení polohy lze řídit spojitě. V praxi to znamená, že dojde-li k malé změně polohy, je reakce velmi citlivá. Naopak, je-li změna velká, ventil lze otevřít úplně, což má za následek rychlý návrat do požadované polohy.

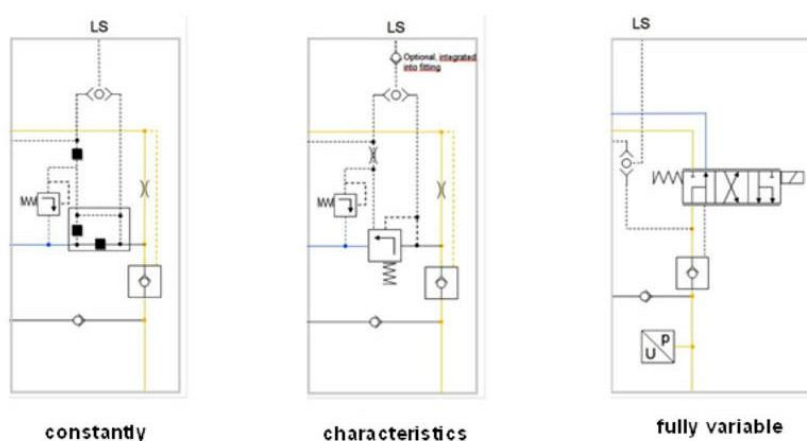


Obr. 45 Základní modul s 4/3 polohovým řídicím ventilem [37]

Blok je spojen s řídicí jednotkou, která slouží k řízení jeho veškerých funkcí. Informace potřebné pro její správnou činnost jsou získávány z ovládacího panelu (TD) a od různých snímačů, případně z datové sběrnice (CAN BUS) vozidla. Základní konfigurace je taková, že hydraulický blok je spojen s hydraulickým válcem. Může tak řídit polohu pístu uvnitř válce.

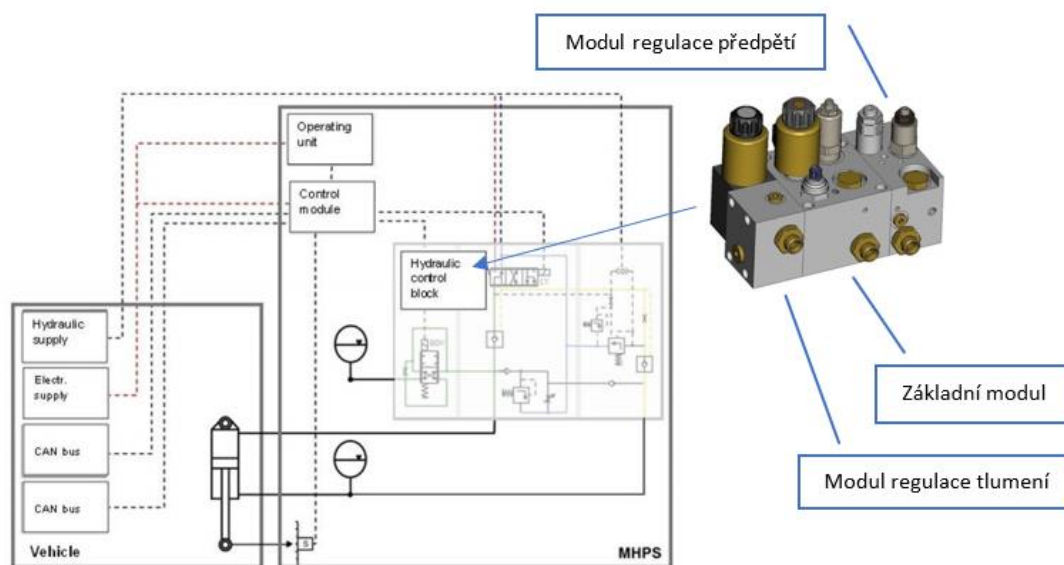
Je-li použita sofistikovanější koncepce, potom lze také regulovat tlak v prostoru pístnice. K tomu slouží moduly pro regulaci předpětí. V závislosti na použití lze volit mezi třemi základními typy.

První variantou je možnost udržení konstantního tlaku. Druhou je pak řízení tlaku podle přednastavené charakteristiky. Poslední možností je plynulá (variabilní) regulace tlaku, přičemž je použito proporcionálního rozvaděče. Ten v kombinaci se snímačem tlaku zajistí již zmíněnou plynulost. Modifikací tohoto modulu vzniká další varianta, umožňující plnění komory pístnice plným tlakem čerpadla.



Obr. 46 Schéma modulů regulace předpětí [37]

Volitelně lze řídicí blok spojit také s komorou pístu a se zásobníkem pomocí modulu regulace tlumení. Pomocí něj lze i pérování zablokovat, což je funkce výhodná zejména pro pracovní stroje.



Obr. 47 Celkové schéma modulárního systému [37]

Obecně se tento modulární systém používá k odpružení kol nebo náprav, výložníků či kabin. Konkrétní typy vozidel, u kterých se lze s tímto systémem setkat, jsou:

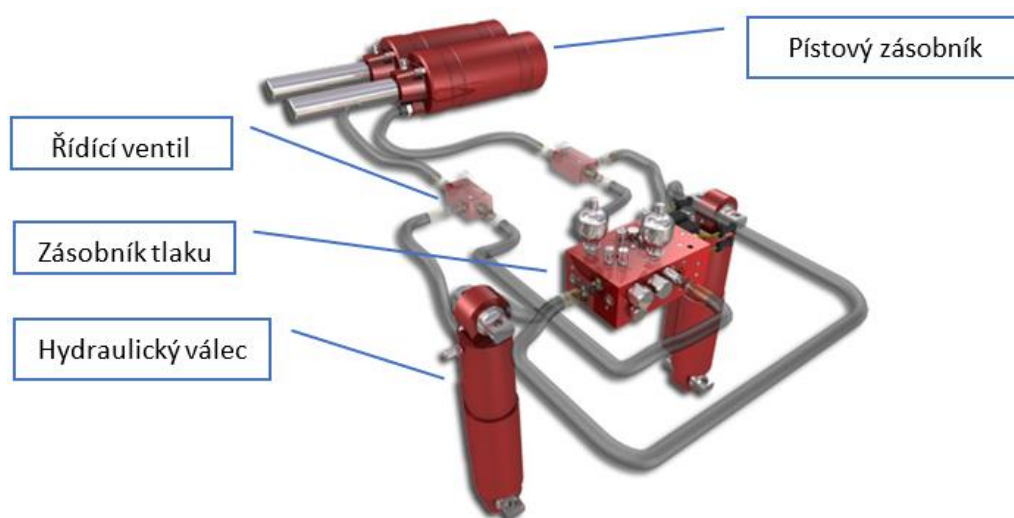
- traktory, kde je systém využíván pro odpružení přední nápravy, kabiny...
- pracovní stroje, kde je typickou aplikací odpružení všech kol (např. u polního postřikovače), výložníku (např. nakladače), zadní nápravy kombajnu...
- přívěsy, konkrétně odpružení jejich náprav, či tažného zařízení

7.3 HHP™ HYDRO-PNEUMATIC™ SUSPENSION SYSTEM

Systém od firmy Hendrickson nabízí patentované konstrukční řešení. Odpružení je určeno zejména pro terénní vozidla, mezi které patří i různé vojenské speciály.

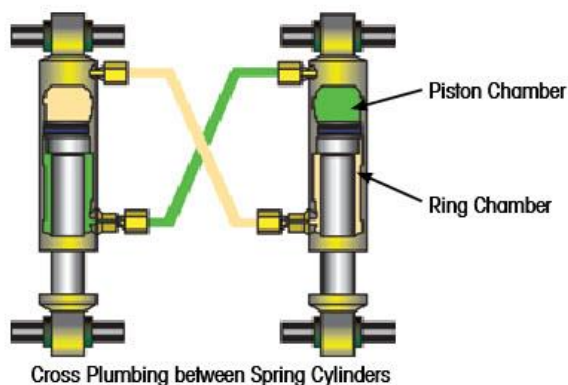
7.3.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukční řešení odpružení nápravy je následující. Uprostřed je umístěn zásobník tlaku, z něhož vedou potrubí k řídicím ventilům, ty jsou přes něj rovněž propojeny. Ke každému řídicímu ventilu je připojen hydraulický dvojčinný válec a rovněž hydraulický pístový zásobník se třemi komorami [39]. Tato konfigurace vede ke snížení vibrací a účinně tlumí rázy.



Obr. 49 Schéma systému HHP™ [39]

Volitelně lze dodat doplňkový systém CROSS-Control, který spočívá v křížovém propojení komor válců. Dojde tak ke snížení klopení. To může být vyvoláno rychlým manévrem či nerovnostmi terénu.



Obr. 48 CROSS-Control systém [39]

7.3.2 VLASTNOSTI

Mezi důležité vlastnosti patří nízká tuhost poskytovaná zásobníky bez ohledu na zatížení [39]. Jsou rovněž schopny efektivně vyrovnat zatížení, což má za následek zlepšení kontaktu kol s vozovkou. Dochází tak ke zvýšení trakce. Dále lze měnit světlou výšku nastavením nulové polohy, kde vyšší poloha zabezpečí lepší průchodnost terénem. Volitelný blokovací systém je zase schopen automaticky uzamknout světlou výšku vozidla, je-li to žádoucí. Takovou situaci může být například jeho vlečení, nakládka, vykládka či satelitní komunikace. V těchto případech pak není systém napájen a nedochází k nadbytečné spotřebě energie či paliva. Za zmínku stojí i hydraulické ventily, ty řídí tlumení v závislosti na zatížení. To má příznivý vliv na jízdu v těžkých podmínkách. Systém je rovněž adaptabilní, lze ho aplikovat na více náprav a přizpůsobit širokému rozsahu zatížení.

7.3.3 PŘÍKLADY POUŽITÍ

Systém je využíván například k odpružení zadních náprav u vojenských vozidel Oshkosh, konkrétně modelů MK36 a LVSR [40].



Obr. 50 Oshkosh LVSR [41]



Obr. 51 Oshkosh MK36 [42]

8 NÁVRH ODPRUŽENÍ

Dle zadání je náplní této části práce navrhnout odpružení vojenského speciálu, disponujícího pohotovostní hmotností kolem deseti tun. Po uvážení tohoto limitu bylo zvoleno vozidlo Tatra T 815-7L0R59 19 257 4x4.1R, jehož pohotovostní hmotnost činí 8,5 tuny. S přihlédnutím k faktu, že se armádní speciál z velké části pohybuje různorodým terénem, je nutné zkonstruovat takové odpružení, které disponuje nízkou tuhostí. Tím je totiž docíleno měkkého charakteru pérování, který je pro tuto aplikaci žádoucí. Nejvhodnější volbou je tedy hydropneumatický systém bez předpětí, neboť jakékoliv předpětí by způsobovalo dodatečnou tuhost.

Celý návrh je možno rozdělit do dvou částí. První je věnována hydropneumatickým komponentám, které zajišťují pružení, zatímco druhá sekce obsahuje prvky tlumení.



Obr. 52 Tatra T 815-7L0R59 19 257 4x4.1R [43]

Aby šel návrh uskutečnit, je důležité určit vstupní hodnoty.

Tab. 1 Vstupní hodnoty

Proměnná s hodnotou	Název
$m_{\min}=3170 \text{ kg}$	Minimální zatížení nápravy
$m_{\max}=8500 \text{ kg}$	Maximální zatížení nápravy
$f=1,3 \text{ Hz}$	Přirozená frekvence
$n=1,3$	Polytropický exponent
$x=300 \text{ mm}$	Zdvih kola
$i=1,6$	Pákový poměr („motion ratio“)

$p_{\text{sys}} = 16 \text{ MPa}$	Tlak dodávaný čerpadlem
$F_{F1,\text{min}} = 31090 \text{ N}$	Minimální zatížení zadané
$F_{F1,\text{max}} = 83360 \text{ N}$	Minimální zatížení zadané
$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Gravitační zrychlení
$\nu = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$	Kinematická viskozita LDS oleje při 40°C
$p_{\text{Kav}} = 0,1 \text{ Pa}$	Tenze par oleje LDS při 20°C
$\rho = 830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota oleje při 15°C

Ze zadaných hodnot je možné určit zdvih hydraulického válce h:

$$h = x \cdot \frac{1}{i} \quad (1)$$

$$h = 0,3 \cdot \frac{1}{1,6} = 0,188 \text{ m}$$

8.1 NÁVRH KOMPONENT PRUŽENÍ

Základním parametrem, který je nutné určit, je velikost tlaku v systému [6]. Od této hodnoty se pak odvíjí rozměry jednotlivých komponent tak, aby jejich činné části (strana pístu/ pístnice) byly schopné poskytnout dostatečnou mechanickou stabilitu. Tedy aby odolaly vnitřním zatížením, jež jsou vyvolány právě tlakem.

Existuje mnoho aspektů, které tlak v systému ovlivňují. Obecně je lze rozdělit do dvou skupin. První skupina jsou faktory, které jsou dány vnějšími okolnostmi. Konkrétně se jedná o rozsah zatížení (minimální až maximální), pákový poměr a maximální tlak, který lze systému dodat. Druhá skupina zahrnuje parametry, které mohou být vývojářem zvoleny. Mezi ně patří průměr pístu, tlak hydraulických komponent...

Pro správné rozměry komponent je nutné uvědomit si, že dynamické změny tlaku (v důsledku pohybu odpružení), zvyšují tlak statický. Tím je dána celková hodnota tlaku. Dále v závislosti na množství oleje a též na způsobu provozu zásobníku (objem plynu při statickém tlaku), se výkyvy tlaku značně liší. Ochranou proti nim může být například instalace tlakového pojistného ventilu do systému odpružení.

8.1.1 HYDRAULICKÝ VÁLEC

Návrhem této komponenty obvykle každý návrh odpružení začíná. Je nutné mít na paměti, že pro dimenzování hydraulického válce je žádoucí, aby bylo maximálně využito dostupného tlaku [6]. Tedy tlaku, který je do systému dodáván hydraulickým čerpadlem.

Tímto je stanovena první vstupní hodnota, kterou je nutné na počátku znát. Obvykle ji lze nalézt v technických údajích o hydraulickém čerpadle. Nese označení p_{sys} .

Druhým vstupem, který je pro výpočet nezbytný, je maximální velikost síly $F_{F1,max}$, která bude působit na hydropneumatickou pružinu. V praxi je většinou konstruktér obeznámen s hmotností zatíženého vozidla, které na nápravu působí.

V případě konkrétního návrhu obsaženého v této práci je zvolen hydraulický dvojčinný válec, i z důvodu, že oproti jednočinnému je schopen poskytnout vyšší tlumení odskoku. Dále je počítáno s faktem, že je zvolen systém bez předpětí. V případě této kombinace je určen místo průměru pístu průměr pístnice d_S .

Na začátek výpočtu průměru pístnice je zapotřebí stanovit rovnováhu sil působících na píst [6]:

$$F_K = F_{F1,max} \quad (2)$$

kde F_K je síla působící na aktivní oblast na straně pístu. Je-li nahrazena síla obecně známým vztahem:

$$F = p \cdot S \quad (3)$$

kdy za tlak p je dosazeno p_{sys} a za plochu S plocha pístnice, má výraz podobu:

$$\frac{\pi \cdot d_S^2}{4} \cdot p_{sys} = F_{F1,max} \quad (4)$$

Vyjádřením d_S z předchozí rovnice je k dispozici finální podoba vztahu pro výpočet průměru pístnice:

$$d_S = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{F1,max}}{\pi \cdot p_{sys}}} \quad (5)$$

$$d_S = \sqrt{\frac{4 \cdot 83360}{3,14 \cdot 16 \cdot 10^6}} = 82 \text{ mm}$$

Je nutné poznamenat, že tlak p_{sys} dosazovaný do rovnice výše, má vždy o něco nižší hodnotu než tlak maximální. Důvodem jsou tlakové ztráty mezi zdrojem tlaku (čerpadlem) a válcem. Dále vzniká nevyhnutelná tlaková ztráta průchodem ventilovým systémem, a to při vyrovnávacím procesu, uvnitř vyrovnávacího bloku. Je nezbytné omezit průtok k válci, např. pomocí trysky, tím se docílí optimální rychlosti vyrovnávání. Pro další výpočet lze počítat s faktem, že díky tomuto omezení je vhodné snížit maximální tlak o 1 MPa [6].



Obr. 53 Hydraulický dvojčinný válec (ilustrační foto) [44]

8.1.2 MNOŽSTVÍ PLYNU V ZÁSOBNÍKU

Dalším krokem je stanovení celkového množství plynu $p_0 V_0$ obsaženého v zásobníku. Tím je zajištěna správná funkce systému.

Pro systém bez předpětí je výpočet relativně snadný, neboť je zapotřebí vypočítat pouze množství plynu na straně pístu. Vztah vypadá následně [6]:

$$p_0 \cdot V_0 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \cdot n \cdot F_{F1} \cdot g \quad (6)$$

$$p_0 \cdot V_0 = \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,3} \right)^2 \cdot 1,3 \cdot 57220 \cdot 9,81 = 10930 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$$

Výpočet však s sebou přináší další část vstupních proměnných, které je třeba znát.

Předně se jedná o zatížení hydropneumatické pružiny F_{F1} . S přihlédnutím k proměnlivosti zatížení, je nutné počítat s typickým zatížením (které působí většinu času). Druhou možností je určit průměrné zatížení z maximální a minimální hodnoty. Další výpočet se bude řídit právě druhým zmíněným způsobem. Je potřeba však znát minimální hodnotu zatížení $F_{F1,min}$, tu lze stanovit z minimálního zatížení vozidla. Výpočet pak bude:

$$F_{F1} = \frac{F_{F1,max} + F_{F1,min}}{2} \quad (7)$$

$$F_{F1} = \frac{83360 + 31090}{2} = 57220 \text{ N}$$

Dále je nutné znát vlastní frekvenci odpružené hmoty f a polytropický exponent n .

8.1.3 PODROBNÝ VÝPOČET p_0 A V_0

V předchozí podkapitole bylo řešeno množství plynu p_0V_0 uzavřené v zásobníku. Nyní je potřeba najít vhodné hodnoty jeho nejdůležitějších parametrů, těmi jsou počáteční tlak p_0 a objem V_0 [6]. Je důležité uvést, že následné výpočty jsou prováděny v místě, které se nachází přesně v polovině vzdálenosti mezi koncovými polohami stlačení a odskoku.

Co se týče typu zásobníku, jsou převážně používány svařované membránové akumulátory. Jejich provoz je však omezen určitým tlakovým rozsahem. Pro jejich správnou aplikaci je důležité řídit se následujícími kritérii. Tím prvním je podmínka maximálního tlaku, přičemž druhým kritériem je maximální přípustná deformace membrány. Zde platí pravidlo 10 %. To znamená, že kdykoliv během provozu musí zásobník disponovat alespoň 10 % hydraulické kapaliny nebo plynu.



Obr. 54 Řez membránovým zásobníkem [26]

Právě z kritéria deformace membrány vychází poznatek, že tlakové limity závisí též na počátečním tlaku zásobníku.

Lze tedy konstatovat, že zásobník musí být provozován mezi [6]:

$$V = 0,1 \cdot V_0 \quad (8)$$

$$V = 0,9 \cdot V_0 \quad (9)$$

Pro výpočet minimálního tlaku p_{\min} a maximálního tlaku p_{\max} je předepsán vztah [6]:

$$p_{\min} = \frac{p_0 \cdot V_0}{0,9 \cdot V_0} = 1,11 \cdot p_0 \quad (10)$$

$$p_{\max} = \frac{p_0 \cdot V_0}{0,1 \cdot V_0} = 1,11 \cdot p_0 \quad (11)$$

Je-li vytvořen poměr z maximální a minimální hodnoty, jeho hodnota činí 9. Jeho platnost je však pouze při pokojové teplotě okolí. Neboť je žádoucí přiblížit se při výpočtu reálným podmínkám, a protože vysoké teploty zvyšují tlak minimální, přičemž nízké snižují tlak maximální, je rovnice upravena [6].

Pro rozmezí -20 až +60 °C vztahy vypadají následně:

$$p_{min} = 1,11 \cdot p_0 \cdot \frac{333,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} = 1,26 \cdot p_0 \quad (12)$$

$$p_{max} = 10 \cdot p_0 \cdot \frac{253,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} = 8,64 \cdot p_0 \quad (13)$$

Co se týče tlakového poměru, je jeho hodnota nyní cca. 6,85.

Z tohoto zjištění vyplývá, že po zvoleném rozsahu teplot poměr klesnul. Došlo tak k významnému úbytku na funkčnosti odpružení. Pro reálnou aplikaci je tak velmi důležité vyhodnotit přesný rozsah teplot. Na místě je i otázka, zda bude v extrémních teplotách potřeba využít plný rozsah odpružení.

Dalším aspektem, ovlivňujícím tlakový poměr, jsou nepřesnosti výrobního procesu [6]. Počáteční tlak v zásobníku tak má obvykle určitou toleranci. Pro výpočty se uvažuje $\pm 5 \%$. Kladná odchylka zvyšuje p_{min} , naopak záporná snižuje p_{max} .

Rovnice jsou tedy upraveny následně:

$$p_{min} = 1,26 \cdot p_0 \cdot 1,05 = 1,32 \cdot p_0 \quad (14)$$

$$p_{max} = 8,64 \cdot p_0 \cdot 0,95 = 8,21 \cdot p_0 \quad (15)$$

Tlakový poměr opět klesnul, a to na hodnotu 6,2.

Tímto je určena finální podoba pro minimální tlak. Nejedná se však o konečnou hodnotu pro tlak maximální. Je třeba zohlednit plyn, difundující přes membránu do kapaliny [6]. Tím dojde ke snížení maximálního tlaku. Předpokládá se tlaková ztráta 10 % mezi servisními intervaly.

Lze tedy zapsat finální podobu vztahu pro stanovení maximálního tlaku:

$$p_{max} = 8,21 \cdot p_0 \cdot 0,9 = 7,39 \cdot p_0 \quad (16)$$

Výsledný poměr tlaků je tedy 5,6.

Předešlý výpočet jasně demonstuje, jak důležité je při výpočtu zohlednit všechny aspekty. Také poukazuje na fakt, že membránový akumulátor není zcela vhodný pro široké rozsahy zatížení [6]. Nabízí se například použití pístových zásobníků, ty jsou však spojeny s vyššími náklady a vyskytuje se u nich poměrně vysoké vnitřní tření. Jejich aplikace v hydropneumatických systémech je tak spíše výjimkou.

8.1.4 ZÁSOBNÍK NA STRANĚ PÍSTU

Hydropneumatické systémy bez předpětí používají zásobník připojený k válci v oblasti činnosti pístu. Obvyklé je následné dodatečné propojení oblasti činnosti pístu s prostorem pístnice.

Podobně jako u návrhu hydraulického válce je vhodné vyjít z rovnováhy sil, které působí na píst [6].

$$F_K = F_{F1} \quad (17)$$

$$p_1 \cdot A_K = F_{F1} \quad (18)$$

kde A_K představuje aktivní plochu na straně pístu. V případě systému bez předpětí má na tlak p_1 vliv pouze statické zatížení hydropneumatické pružiny F_{F1} působící v konstrukční poloze odpružení [6].

Z důvodu, že tlak v zásobníku na straně pístu (s pístem v konstrukční poloze), je dán vnějším statickým zatížením, je dalším krokem výpočet tlaků pro minimální a maximální statické zatížení hydropneumatické pružiny [6].

Vztahy vypadají následně:

$$p_{1,min} \cdot A_K = F_{F1,min} \quad (19)$$

$$p_{1,max} \cdot A_K = F_{F1,max} \quad (20)$$

Jsou-li vyjádřeny tlaky:

$$p_{1,min} = \frac{F_{F1,min}}{A_K} \quad (21)$$

$$p_{1,max} = \frac{F_{F1,max}}{A_K} \quad (22)$$

Pomocí derivace lze určit optimální počáteční tlak uvnitř zásobníku [6]:

$$p_0 = \frac{\frac{F_{F1,min}}{A_K} \cdot \frac{F_{F1,max}}{A_K}}{\frac{F_{F1,min}}{A_K} + \frac{F_{F1,max}}{A_K}} \quad (23)$$

Je-li vztah upraven, rovnice vypadá takto:

$$p_0 = \frac{F_{F1,min} \cdot F_{F1,max}}{A_K \cdot (F_{F1,min} + F_{F1,max})} \quad (24)$$

$$p_0 = \frac{31090 \cdot 83360}{0,00985 \cdot (31090 + 83360)} = 2,298 \text{ MPa}$$

kde za A_K je dosazen vztah:

$$A_K = \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} \quad (25)$$

$$A_K = \frac{3,14 \cdot 0,112^2}{4} = 9,852 \text{ mm}^2$$

kde za d_K je dosazen vhodně zvolený průměr pístu, jehož hodnota se odvíjí od průměru pístnice. Po průzkumu trhu s hydraulickými dvojčinnými válci byl zvolen právě tento rozměr.

V této fázi výpočtu lze pomocí vypočtené hodnoty p_0 a již dříve určeného množství plynu v zásobníku, stanovit hodnotu V_0 .

$$V_0 = \frac{p_0 \cdot V_0}{p_0} \quad (26)$$

$$V_0 = \frac{10930}{2,298 \cdot 10^6} = 0,004757 \text{ m}^3$$

Dále lze pomocí kritéria deformace membrány určit minimální a maximální tlak na straně pístu, při statickém zatížení hydropneumatické pružiny v konstrukční poloze odpružení [6]:

$$p_{1,min} = \frac{V_0 \cdot p_{0,T,korr}}{0,9 \cdot V_0 - A_K \cdot \frac{h}{2}} \quad (27)$$

$$p_{1,min} = \frac{V_0 \cdot 1,32 \cdot p_0}{0,9 \cdot V_0 - A_K \cdot \frac{h}{2}} = \frac{0,00475 \cdot 1,32 \cdot 2,298 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 0,00475 - 9,85 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,188}{2}} = 4,298 \text{ MPa}$$

kde $p_{0,T,korr}$ představuje korigovanou hodnotu tlaku a h zdvih hydraulického válce. Lze ho určit pomocí pákového poměru i a zdvihu kola.

Předpoklady platnosti rovnice 27 jsou: maximální teplota, horní mez přípustného množství plynu, žádná difuze

$$p_{1,max} = \frac{V_0 \cdot p_{0,T,korr}}{0,1 \cdot V_0 + A_K \cdot \frac{h}{2}} \quad (28)$$

$$p_{1,max} = \frac{V_0 \cdot 7,39 \cdot p_0}{0,1 \cdot V_0 + A_K \cdot \frac{h}{2}} = \frac{0,00475 \cdot 7,39 \cdot 2,298 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 0,00475 + 9,85 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,188}{2}} = 57,742 \text{ MPa}$$

Předpoklady platnosti rovnice 28 jsou: minimální teplota, dolní mez přípustného množství plynu, maximální difuze

Dosazením $p_{1,min}$ a $p_{1,max}$ do rovnic číslo 21, resp. 22 za p_1 je určen skutečný přípustný rozsah statického zatížení hydropneumatické pružiny [6].

Vztahy jsou následující:

$$F_{F1,min} = \frac{V_0 \cdot p_{0,T,korr}}{0,9 \cdot V_0 - A_K \cdot \frac{h}{2}} \cdot A_K \quad (29)$$

$$F_{F1,max} = \frac{V_0 \cdot p_{0,T,korr}}{0,1 \cdot V_0 + A_K \cdot \frac{h}{2}} \cdot A_K \quad (30)$$

Přičemž za hodnoty $p_{0,T,korr}$ je v případě minimálního zatížení dosazena rovnice číslo 14 a v případě maximálního zatížení rovnice číslo 16.

Po dosazení platí:

$$F_{F1,min} = \frac{V_0 \cdot 1,32 \cdot p_0}{0,9 \cdot V_0 - A_K \cdot \frac{h}{2}} \cdot A_K \quad (31)$$

$$F_{F1,min} = \frac{0,00475 \cdot 1,32 \cdot 2,298 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 0,00475 - 9,85 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,188}{2}} \cdot 9,85 \cdot 10^{-3} = 42340 \text{ N}$$

$$F_{F1,max} = \frac{V_0 \cdot 7,39 \cdot p_0}{0,1 \cdot V_0 + A_K \cdot \frac{h}{2}} \cdot A_K \quad (32)$$

$$F_{F1,max} = \frac{0,00475 \cdot 7,39 \cdot 2,298 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 0,00475 + 9,85 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,188}{2}} \cdot 9,85 \cdot 10^{-3} = 568900 \text{ N}$$

Získané hodnoty $F_{F1,min}$ a $F_{F1,max}$ se následně vydělí pákovým poměrem:

$$F_{F1,minreal} = \frac{F_{F1,min}}{i} \quad (33)$$

$$F_{F1,minreal} = \frac{42340}{1,6} = 26460 \text{ N}$$

$$F_{F1,minreal} = \frac{F_{F1,max}}{i} \quad (34)$$

$$F_{F1,minreal} = \frac{568900}{1,6} = 355500 \text{ N}$$

Vhodné je ještě stanovit tuhost:

$$k = n \cdot \frac{F_{F1}^2}{p_0 \cdot V_0} \quad (35)$$

$$k = 1,3 \cdot \frac{57220^2}{2,298 \cdot 10^6 \cdot 0,00475} = 389,303 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

8.2 NÁVRH PRVKŮ TLUMENÍ

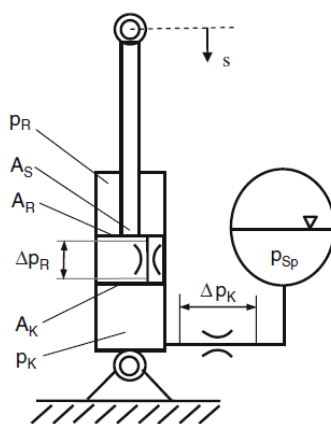
Dalším krokem v návrhu hydropneumatického odpružení je, jak název napovídá, zajistit systému potřebné tlumicí síly. Zařízení k tomuto účelu určená se nazývají přídavné průtokové odpory (viz. 4.3). Nesnadným úkolem je v případě použití nevariabilního tlumicího systému nalézt kompromis pro velikost tlumících sil [6]. Zvláště pak u systémů odpružení, u kterých je žádoucí pokrýt široký rozsah statických zatížení.

Přímo nežádoucím jevem je vznikající kavitace v důsledku tlakových ztrát, které jsou způsobeny právě přídavnými odpory. Jejím projevem je například hluk, možná destrukce

součástí uvnitř válce, či omezení tlumících sil. Při návrhu je tedy důležité dimenzovat komponenty tak, aby ke kavitaci nedošlo.

8.2.1 PŘÍDAVNÉ PRŮTOKOVÉ ODPORY

Pro návrh je tedy zvolen dvojčinný válec, který má být součástí systému bez předpětí. Jako logické se nabízí použít dva průtokové odpory. Co se týče jejich uspořádání, je zvolena varianta taková, že jeden odpor je umístěn přímo v pístu a druhý ponechán v hydraulickém okruhu pístu. Jejich správným navržením a uspořádáním bude možné docílit podstatně vyššího tlumení odskoku [6].



Obr. 55 Schéma umístění odporů
[6]

Nejjednodušším způsobem pro výpočet tlumících sil, je stanovení tepelného výkonu, který je generován uvnitř průtokových odporů z kinetické energie kapaliny. Zmíněný tepelný výkon je roven tlumicímu výkonu $P_{D,hyd}$.

Vztah pro výpočet tepelného výkonu je [6]:

$$P_{D,hyd} = \Delta p_K \cdot \dot{V}_S + \Delta p_R \cdot \dot{V}_R \quad (36)$$

Vzhledem k tomu, že jsou propojeny obě strany válce, je průtokový odpor na straně pístu vystaven pouze průtoku, který vznikne posunutím pístnice o aktivní ploše A_S [6].

Tedy [6]:

$$\dot{V}_S = A_S \cdot v \quad (37)$$

$$\dot{V}_R = A_R \cdot v \quad (38)$$

kde A_R představuje aktivní plochu na straně pístnice:

$$A_R = \pi \cdot \left[\left(\frac{d_K}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_S}{2} \right)^2 \right] \quad (39)$$

$$A_R = 3,14 \cdot \left[\left(\frac{0,112}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,081}{2} \right)^2 \right] = 0,00464 \text{ m}^2$$

Je vhodné určit i aktivní plochu na straně pístitnice A_S :

$$A_S = \frac{\pi \cdot d_S^2}{4} \quad (40)$$

$$A_S = \frac{3,14 \cdot 0,081^2}{4} = 0,00521 \text{ m}^2$$

Dále platí vztah:

$$F_{D,hyd} = \frac{P_{D,hyd}}{v} \quad (41)$$

kde $F_{D,hyd}$ je tlumící síla vyvolaná viskózním třením.

Po dosazení rovnice číslo 32 do rovnice číslo 35 je rovnice upravena:

$$F_{D,hyd} = \Delta p_K \cdot A_S + \Delta p_R \cdot A_R \quad (42)$$

Tuto rovnici lze použít pro návrh obou průtokových odporů [6]. Je ale nutné, aby byl pomocí nich průtok omezen přibližně stejně. Pokud by se tak nestalo, mohlo by dojít ke kavitaci. Příslušné tlaky a stanovení limitů pro zamezení kavitace je dále vysvětleno. Pro návrh jsou uvažovány průtokové odpory s charakterem škrticí klapky.

Pro stlačení je definováno [6]:

$$p_R = p_{Sp} + \Delta p_K - \Delta p_R \quad (43)$$

$$\Delta p_R = p_{Sp} + A_S \cdot v \cdot v \cdot \rho \cdot K_{D,K} - A_R \cdot v \cdot v \cdot \rho \cdot K_{D,R} \quad (44)$$

Pro odskok [6]:

$$p_K = p_{Sp} - \Delta p_K \quad (45)$$

$$\Delta p_K = p_{Sp} - A_S \cdot v \cdot v \cdot \rho \cdot K_{D,K} \quad (46)$$

kde p_R je tlak na straně pístitnice, p_{Sp} tlak v zásobníku, v kinematická viskozita, v rychlost stlačení/odskoku, ρ hustota kapaliny, $K_{D,R}$ konstanta definující geometrii a rozměry průtokového odporu (škrticí klapky) v pístu, p_K tlak na straně pístu, $K_{D,K}$ konstanta definující geometrii a rozměry průtokového odporu (škrticí klapky) na straně pístu.

Z rovnice číslo 40 lze vypočítat limit pro průtokový odpor na straně pístu $K_{D,K,grenz}$, přičemž za p_K je dosazen tlak kavitací p_{Kav} [6]:

$$K_{D,K,grenz} = \frac{p_{Sp} - p_{Kav}}{A_S \cdot v \cdot v \cdot \rho} \quad (47)$$

$$K_{D,K,grenz} = \frac{p_0 - p_{Kav}}{A_S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot v \cdot \rho}$$

$$K_{D,K,grenz} = \frac{2,298 \cdot 10^6 - 0,1}{0,00521 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,188} \cdot 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot 830} = 1,459 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3}$$

Následně lze stanovit limit pro průtokový odpor na straně pístnice $K_{D,R,grenz}$, kdy je v rovnici číslo 38 za p_R dosazeno p_{Kav} [6]:

$$K_{D,R,grenz} = \frac{p_{Sp} - p_{Kav} + A_S \cdot v \cdot \eta \cdot K_{D,K}}{A_R \cdot v \cdot v \cdot \rho} \quad (48)$$

Dosažením $K_{D,K,grenz}$ do rovnice číslo 42 [6]:

$$K_{D,R,grenz} = \frac{2 \cdot (p_{Sp} - p_{Kav})}{A_R \cdot v \cdot v \cdot \rho} \quad (49)$$

$$K_{D,R,grenz} = \frac{2 \cdot (p_0 - p_{Kav})}{A_R \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot v \cdot \rho}$$

$$K_{D,R,grenz} = \frac{2 \cdot (2,298 \cdot 10^6 - 0,1)}{0,00464 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,188} \cdot 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot 830} = 3,274 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3}$$

Jsou-li obě limitní hodnoty dány do poměru, vznikne vztah, který určuje ideální poměr pro maximální omezení průtokové odpory [6]. Tak je dosaženo maximální možné tlumení.

Nevyžaduje-li se maximální hodnota tlumení, může poměr sloužit jako základ pro výběr jiné kombinace odporů s charakterem škrticí klapky.

$$\frac{K_{D,R}}{K_{D,K}} = \frac{2 \cdot A_S}{A_R} \quad (50)$$

$$\frac{K_{D,R}}{K_{D,K}} = \frac{2 \cdot 0,00521}{0,00464} = 2,245$$

8.2.2 DORAŽY

Je důležité vyjít z poznatku, že pomocí vhodného uspořádání lze vyvolat konstantní sílu, která sníží rychlost pístu v koncových polohách [6]. Čím blíže bude píst koncové poloze, tím je žádoucí nižší rychlost, a tím, pro konstantní sílu, musí být průtokový odpor více omezující.

Předchozí úvahy dovolují napsat následující vztah:

$$F_{ED} = m \cdot a = \text{konst.} \quad (51)$$

F_{ED} vzniká v důsledku tlakové ztráty Δp_{ED} na průtokovém odporu, která je vynásobena aktivní plochou A_{ED} během tlumení konce zdvihu [6].

Tlaková ztráta je tedy:

$$\Delta p_{ED} = \frac{F_{ED}}{A_{ED}} = \frac{m \cdot a}{A_{ED}} \quad (52)$$

Za předpokladu, že průtokový odpor má charakter škrticí klapky, lze vyjádřit tlakovou ztrátu jako:

$$\Delta p_{ED} = \dot{V}(x) \cdot v \cdot \rho \cdot K_D(x) \quad (53)$$

kde $K_D(x)$ je konstanta definující geometrii a rozměry škrticí klapky.

Použitím rovnice [6]:

$$\dot{V}(x) = v(x) \cdot A_{ED} \quad (54)$$

Je možné spočítat $K_D(x)$:

$$K_D(x) = \frac{\Delta p_{ED}}{v(x) \cdot A_{ED} \cdot v \cdot \rho} \quad (55)$$

Rychlost lze spočítat ze zákonů kinematiky [6]:

$$v(x) = \sqrt{v_0^2(x) + 2 \cdot a \cdot x} \quad (56)$$

$$v(x) = \sqrt{0 + 2 \cdot 9,81 \cdot 0,188} = 1,918 \, m \cdot s^{-1}$$

Přičemž v_0 je rychlost na počátku tlumení konce zdvihu a a je záporné zrychlení, neboť dochází ke zpomalování hmoty [6].

Aplikováním rovnic je definován vztah pro škrticí klapku, která je závislá na posunu [6]:

$$K_D(x) = \frac{m \cdot a}{A_{ED}^2 \cdot v \cdot \rho \cdot \sqrt{v_0^2(x) + 2 \cdot a \cdot x}} \quad (57)$$

$$K_D(x) = \frac{m_{max} \cdot g}{A_K^2 \cdot v \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

$$K_D(x) = \frac{8500 \cdot 9,81}{0,00985 \cdot 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot 830 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,188}} = 2,008 \cdot 10^7 \, m^{-3}$$

Vztah platí pro [6]:

$$0 < x < -\frac{v_0^2}{2 \cdot a} \quad (58)$$

Předpokladem je, že pro počáteční rychlost v_0 se očekává maximální hodnota rychlosti $v_{0,max}$, dále též maximální zpomalovaná hmotnost m_{max} [6]. Dále zpomalení pokračuje až k nulové rychlosti v mezích dostupného posunutí, které je definováno koncem zdvihu x_M .

Pro maximální zrychlení a_{max} platí vztah [6]:

$$a_{max} = -\frac{v_0^2}{2 \cdot x_M} \quad (59)$$

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo objasnit problematiku hydropneumatického odpružení. Neboť toto téma zahrnuje velké množství informací, bylo důležité brát zřetel na logické členění celého textu. S tím přímo souvisí pomyslné dělení práce na část teoretickou a praktickou.

Hlavní úkolem řešerše bylo vysvětlit základy hydropneumatiky. Ačkoliv se na první pohled může zdát, že se jedná o příliš složitý systém, dojde čtenář ke zjištění, že principy funkce, na kterých je založen, lze popsat pomocí více či méně známých faktů. Ty jsou následně v dalších částech textu dle potřeby rozvedeny či jinak obohaceny. Tímto způsobem, spojeným se snahou vysvětlit problematiku pomocí obecně známých poznatků, jsou pak provedeny i další části práce, jejichž úkolem je danou věc objasnit. Příkladem mohou být samotné komponenty odpružení, se kterými systém pracuje. Bylo totiž zjištěno, že se jedná ve strojírenství o běžné součásti. To může vést ke snížení nákladů, vynaložených na výrobu hydropneumatického systému.

Druhým úkolem bylo charakterizovat konstrukční provedení hydropneumatického odpružení u jednotlivých typů vozidel. Bylo zjištěno, že v průběhu let je snahou konstruktérů zavádět do systému stále více elektroniky. Dochází tak k postupnému přechodu od pasivních systémů k systémům adaptivním. Tím je dosaženo mnohem vyšší progresivity odpružení, avšak stoupá celková konstrukční náročnost.

Cílem praktické části bylo navrhnout hydropneumaticky odpružené vozidlo. Jedná se o vojenský dvounápravový speciál s pohotovostní hmotností kolem deseti tun. Při samotném dimenzování byly uplatněny informace získané z řešeršní části práce, dále pak z termomechaniky, dynamiky a hydromechaniky. Lze konstatovat, že pro armádní vozidla je hydropneumatika vhodným řešením odpružení, neboť její progresivita má pozitivní vliv na ovladatelnost vozidla, a to i v těžkém terénu.

Co se týče budoucnosti, skrývá v sobě hydropneumatické odpružení značný potenciál. Nejedná se tedy pouze o slepou vývojovou větev, která by skončila využitím u osobních vozů Citroën v padesátých letech. Hydropneumatika se postupně rozvíjí a s přihlédnutím k faktu, že pomocí elektroniky o ní lze mluvit jako o adaptivním systému, bude i nadále konkurenceschopným systémem odpružení. Existuje několik výrobců, kteří se jejímu vývoji intenzivně věnují. Zajímavým faktem je, že ačkoliv byla primárně vymyšlena pro osobní auta, její dnešní využití je zejména v případě nákladních aut, traktorů apod.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Paul Mages. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 16 January 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Mag%C3%A8s
- [2] Citroën Traction Avant 15 Six. In: *Julian Marsh/Citroënët* [online]. 2009 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/passenger-cars/michelin/traction/15CV/traction-avant-15-six-2.html>
- [3] Hydropneumatic/Hydraulic Suspension Systems. In: *Unique Cars And Parts-The Ultimate Classic Car Resource* [online]. 2001 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://www.uniquecarsandparts.com.au/how_it_works_hydropneumatic_suspension
- [4] The special presidential cars built by Franay and Chapron for Président Coty. In: *Citroënët* [online]. 2001 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/miscellaneous/president/15-six.html>
- [5] Citroën DS. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 31 August 2017 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Citro%C3%ABn_DS
- [6] BAUER, Wolfgang. *Hydropneumatic suspension systems*. Vyd. 1. New York: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-15146-0.
- [7] JELÍNEK, Michal. Učíme v prostoru: Pružiny. In: *SlidePlayer* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3035299/>
- [8] Hydraulický válec. In: *Hydraulický válec* [online]. CS Technika s.r.o. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.hydraulicky-valec.cz/>
- [9] Katalog STOLL ClassicLine, 1 March 2016, 2 March 2016 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.stoll-germany.com/en/downloads?kategorie=Prospekte>
- [10] Traktory řada 6020. In: *Agrotip* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.agrotip.cz/john-deere/tr6020.php>
- [11] [Detail odpružení kabiny (HCS by John Deere)]. In: *salesmanual.deere.com* [online]. 23. července 2013 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/images/NA/tractors/6030/mb431536_6230p_mfwd_hcs.jpg
- [12] [Přední náprava modelové řady Case Puma]. In: *www.forum-macchine.it* [online]. 20. leden 2008 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.hwtweakers.net/files/forum/0801/terra_glide.png
- [13] [Schéma odpružení přední nápravy TLS]. In: *salesmanual.deere.com* [online]. 3. srpen 2009 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/images/NA/tractors/6030/non_mb_tls_schematic.jpg

- [14] [Detail odpružení TLS II]. In: *salesmanual.deere.com* [online]. 25. březen 2009 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/images/NA/tractors/7030lf/mb419647_7030_tls.jpg
- [15] Katalog John Deere ŘADA 6R, říjen 2016 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: tištěná verze
- [16] Smykové tření. In: *MEF* [online]. 2006 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>
- [17] Tření. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 11 února 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C5%99en%C3%AD&oldid=15634402>
- [18] Viscosity. In: *OELCHECK* [online]. 2012 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://en.oelcheck.com/wiki/Viscosity>
- [19] INSTRUMENTATION EQUIPMENT 2. *Electronic kits and instrument system* [online]. 23 February 2010 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://potran09.blogspot.cz/2010/02/flow-measurement-there-are-various.html>
- [20] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN isbn80-239-6464-x.
- [21] [Jednočinný válec plunžrový]. In: *www.hoven.de* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.hoven.de/wp-content/uploads/2016/04/Plunger-B3-768x321.jpg>
- [22] [Dvočinný diferenciální válec]. In: *www.hoven.de* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.hoven.de/wp-content/uploads/2016/04/Differenz-B3-768x321.jpg>
- [23] [Dvočinný stejnochodý válec]. In: *www.hoven.de* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.hoven.de/wp-content/uploads/2016/04/Gleichgang-B3-768x321.jpg>
- [24] SOLIL, Milan. Elektropneumatické a hydraulické obvody: Hydraulické zásobníky. In: *SlidePlayer* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3168792/>
- [25] Hydropneumatické akumulátory. In: *Parker* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.parker.cz/produkty/hydraulika/hydropneumaticke-akumulatory-olaer/>
- [26] [Řez membránovým akumulátorem]. In: *ph.parker.com* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.parker.com/Online/Product%20Images/Accumulator-and-Cooler-Division-Europe/zoom_1000x1000/ELM_Diaphragm_Accumulators_alt1zm.jpg?random=1526583886957
- [27] [„Tlumící píst“]. In: *del42sa.rajce.idnes.cz* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://img14.rajce.idnes.cz/d1403/2/2759/2759752_c9a2a588bf0a19b4fbbb35603b7dc34c/images/schmatlumievkouli.jpg?ver=0

- [28] [Princip funkce systému Nivomat]. In: *www.brakeandfrontend.com* [online]. 15. květen 2009 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.brakeandfrontend.com/wp-content/uploads/Articles/03_01_2009/48215nivomat3jp_00000021186.jpg
- [29] Plynokapalinové odpružení Citroënu v zrcadle času. In: *Auto.cz* [online]. 15 prosince 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/technika-plynokapalinove-odpruzeni-citroenu-zrcadle-casu-91284>
- [30] Hydropneumatické odpružení v Citroënech lidé milovali. Přesto končí. In: *AutoRevue.cz* [online]. 18.11.2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/hydropneumaticke-odpruzeni-v-citroenech-lide-milovali-presto-konci>
- [31] [Hydractive II]. In: *www.citroenet.org.uk* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/xantia/images/xanhydractive.jpg>
- [32] [Hydractive III]. In: *www.c5club.cz* [online]. 6. července 2007 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.c5club.cz/graphics/dynamic/galeria/preview_800x600/1183726674468e3c525b082.jpg
- [33] [Hydractive III+]. In: *www.c5club.cz* [online]. 6. července 2007 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.c5club.com/graphics/dynamic/galeria/1183726691468e3c6344ce2.gif>
- [34] [Odpružení přední nápravy Activa]. In: *www.citroenet.org.uk* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/miscellaneous/hydraulics/images/activa-av.jpg>
- [35] [Odpružení zadní nápravy Activa]. In: *www.citroenet.org.uk* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/miscellaneous/hydraulics/images/activa-ar.jpg>
- [36] Anti-roll suspenison. In: *www.citroenet.org.uk* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.citroenet.org.uk/miscellaneous/hydraulics/hydraulics-2.html>
- [37] Hydropneumatické odpružení. In: *ARGO-HYTOS* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com/cz/novinky/archiv/archiv-novinky-pohled/hydropneumatic-suspension-systems-faster-and-more-cost-effective-development.html>
- [38] [Komponenty modulárního systému]. In: *www.powertransmissionworld.com* [online]. 22. ledna 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.powertransmissionworld.com/files/2015/01/Fig_Apertura.jpg
- [39] HHP™. In: *Hendrickson Defense Suspension System* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.hendrickson-intl.com/military/hhp.html>
- [40] Oshkosh TAK-4 Independent Suspension System. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 9 November 2017 [cit.2018-04-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oshkosh_TAK-4_Independent_Suspension_System&oldid=809485398

- [41] [Oshkosh LVSR]. In: *en.wikipedia.org* [online]. 16. května 2008 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d8/Oshkosh_LVSR_MKR18_cargo.jpg/1280px-Oshkosh_LVSR_MKR18_cargo.jpg
- [42] [Oshkosh MK36]. In: *www.military-today.com* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.military-today.com/engineering/oshkosh_mk36.jpg
- [43] [Tatra T 815-7L0R59 19 257 4x4.1R]. In: *www.tatra.cz* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.tatra.cz/cache/images/galleryPreviewBig/tatra_7l0r59_valnik.jpg
- [44] [Hydraulický dvojčinný válec]. In: *www.stackehydraulik.com* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.stackehydraulik.com/sites/default/files/styles/half-n-half/public/main-image/dubbelverkande_manovercylindrar.jpg?itok=HJv85NE4

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m·s ⁻²]	Zrychlení
A_{ED}	[m ²]	Aktivní plocha tlumení konce zdvihu
A_K	[m ²]	Aktivní plocha na straně pístu
A_R	[m ²]	Aktivní plocha na straně pístnice
A_S	[m ²]	Průřez pístnice
d_K	[m]	Průměr pístu
d_S	[m]	Průměr pístnice
F	[N]	Síla
f	[Hz]	Přirozená frekvence
F_{ED}	[N]	Síla vyvolaná tlumením konce zdvihu
F_{FI}	[N]	Průměrná síla působící na hydropneumatickou pružinu
$F_{FI,max}$	[N]	Maximální síla působící na hydropneumatickou pružinu
$F_{FI,min}$	[N]	Minimální síla působící na hydropneumatickou pružinu
F_K	[N]	Síla působící na aktivní oblast na straně pístu
g	[m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
h	[m]	Zdvih hydraulického válce
$K_{D,K}$	[m ⁻³]	Konstanta definující geometrii a rozměry odporu na straně pístu
$K_{D,R}$	[m ⁻³]	Konstanta definující geometrii a rozměry odporu umístěného v pístu
m	[m]	Hmotnost
n	[-]	Polytropický exponent
$p_{,max}$	[Pa]	Maximální tlak na straně pístu
$p_{,min}$	[Pa]	Minimální tlak na straně pístu
p_0	[kg·m ⁻³]	Optimální počáteční tlak uvnitř hydropneumatického zásobníku
$p_{0,T,korr}$	[Pa]	Tlak korigovaný okolnostmi (teplota, množství plynu, difuze)
$P_{D,hyd}$	[W]	Tlumící výkon
p_K	[Pa]	Tlak na straně pístu
p_{Kav}	[Pa]	Kavitační tlak
p_{max}	[Pa]	Maximální tlak
p_{min}	[Pa]	Minimální tlak
p_R	[Pa]	Tlak na straně pístnice
p_{Sp}	[Pa]	Tlak v zásobníku
p_{sys}	[Pa]	Tlak dodávaný do systému odpružení ze zdroje

S	$[\text{m}^2]$	Plocha
V	$[\text{m}^3]$	Objem
v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlost
\dot{V}	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Průtok
V_0	$[\text{m}^3]$	Počáteční objem
v_0	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Počáteční rychlost
\dot{V}_R	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Průtok na straně pístnice
\dot{V}_S	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Průtok na straně pístu
X_{grenz}	$[-]$	Limit pro hodnotu X
x_m	$[\text{m}]$	Délka konce zdvihu
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}]$	Kinematická viskozita